

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

7

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**

№ 7, 2025 год

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

Vol. 7. 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	07.07.2025
Выход в свет	21.07.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 18,00. Тираж 35 экз. Заказ № 78

© 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:	07.07.2025

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 типовой 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).

Давидок 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).

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

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

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

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

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

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, чл.-корр. РААСН, 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Aleksey N. 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, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 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

- Сагадеев Е.В., Сулейманова Л.А., Ибрагимов Р.А., Сагадеев В.В.**
ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОМПОЗИЦИЙ СЕРНЫХ БЕТОНОВ 8
- Кайс Х.А.**
ВЛИЯНИЕ АНТИВСПЕНИВАЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ
ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОГО ВЯЖУЩЕГО 20
- Шилов С.С., Уртенков А.И., Молева А.А.**
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКИХ КРЫШ ПРИ ПОМОЩИ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 33
- Остроушенко Е.Б.**
ПРАВОСЛАВНЫЕ ХРАМЫ АМУРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НАЧАЛА XX ВЕКА 44
- Спирин П.П.**
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ) 54
- Вовженяк П.Ю.**
ОСОБЕННОСТИ СИМВОЛИКИ, МОРФОЛОГИИ И ФЕНОМЕНОЛОГИИ
АРХИТЕКТУРЫ ПЕЩЕРНЫХ МОНАСТЫРЕЙ ПРИДОНЬЯ И ПРИОСКОЛЬЯ 69
- Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Бердников М.Н.**
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ВНОВЬ
ВОЗВОДИМЫХ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
НА ПРИЛЕГАЮЩИЕ УЧАСТКИ УДС 83
- Тарасенко В.Н., Юшин Д.Н., Денисова Ю.В.**
ФОРМИРОВАНИЕ КОМФОРТНОГО СРЕДОВОГО ПРОСТРАНСТВА
С УЧЕТОМ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ 94

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Романюк В.С.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫЧИ 104

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Бондаренко Н.В., Татаринцев И.В., Соколов М.В.**
СИСТЕМА РАСЧЕТА ПРИПУСКА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ 112
- Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П.**
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ
МЕЛЬНИЦЕ 122
- Большаков Г.С., Тарасов Д.А.**
ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЛНОВЫХ
РЕДУКТОРОВ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ 133

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Sagadeev E.V., Suleymanova L.A., Ibragimov R.A., Sagadeev V.V.**
OBTAINING AND STUDYING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF SULFUR CONCRETE COMPOSITIONS 8
- Qais H.A.**
INFLUENCE OF ANTIFOAMING ADDITIVES ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE BASED
ON A GYPSUM-CEMENT-POZZOLAN BINDER 20
- Shilov S.S., Urtenkov A.I., Moleva A.A.**
AERODYNAMIC STUDY OF FLAT ROOFS USING NUMERICAL MODELING 33
- Ostroushenko E.B.**
ORTHODOX TEMPLES OF THE AMUR RAILWAY AT THE BEGINNING
OF 20th CENTURY 44
- Spirin P.P.**
SPATIAL PLANNING. REGIONAL APPROACH (USING THE EXAMPLE
OF THE ARKHANGELSK REGION) 54
- Vovzhenyak P.Y.**
FEATURES OF THE SYMBOLISM, MORPHOLOGY AND PHENOMENOLOGY
OF THE ARCHITECTURE OF THE CAVE MONASTERIES OF PRIDNESTROVIE
AND PRIOSKOLYE 69
- Borovskoy A.E., Smirnova A.Y., Berdnikov M.N.**
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR RAPID ANALYSIS OF THE IMPACT
OF NEW OXS BEING BUILT ON ADJACENT AREAS OF MAC 83
- Tarassenko V.N., Yushin D.N., Denisova Yu.V.**
FORMATION OF A COMFORTABLE ENVIRONMENT TAKING
INTO ACCOUNT ARTIFICIAL LIGHTING 94

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Romanyuk V.S.**
STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC
CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON OIL PRODUCTION WASTE 104

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Bondarenko N.V., Tatarintsev I.V., Sokolov M.V.**
THE ALLOWANCE CALCULATION SYSTEM FOR MACHINING PARTS 112
- Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N., Bogdanov D.V., Nesmeyanov N.P.**
OPTIMIZATION OF GRINDING PROCESS IN BALL MILL DRUM MILL 122
- Bolshakov G.S., Tarasov D.A.**
INCREASING TECHNOLOGY IN THE DESIGN OF WAVE REDUCERS FOR POWER
DRIVES REFERENCES 133

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19

^{1,*}Сагадеев Е.В., ²Сулейманова Л.А., ³Ибрагимов Р.А., ⁴Сагадеев В.В.¹ООО «Коррозионное тестирование строительных материалов»²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова³Казанский государственный архитектурно-строительный университет⁴Казанский национальный исследовательский технологический университет

*E-mail: sagadeev@list.ru

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ СЕРНЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. Разработка новых типов строительных материалов, которые могут долгое время эффективно функционировать в различных агрессивных условиях и климатических зонах, представляет собой одно из наиболее важных направлений в современном строительном материаловедении. В рамках проведенного исследования с использованием метода «горячей» технологии было разработано пятьдесят композиций серных бетонов на основе отходов нефтехимической промышленности и теплоэнергетики с возможностью их применения в производстве сборных конструкций (фундаментных и стеновых блоков, фундаментных плит и др.). В процессе работы были изучены физико-механические свойства этих композиций, включая прочность на сжатие, плотность и водопоглощение. Для достижения оптимальных характеристик серных бетонов необходимо включать три основных компонента: техническую серу, кварцевый песок и золошлаковые отходы с различной степенью дисперсности. Оптимальное содержание серы в композициях должно составлять от 40 % до 45 %, от 25 % до 40 % кварцевого песка и от 15 % до 35 % ЗШО по массе для обеспечения максимальных физико-механических показателей. Исследование выявило, что увеличение доли золошлаковых отходов или кварцевого песка приводит к резкому снижению прочности, росту водопоглощения и снижению плотности образцов. Также было исследовано влияние модификатора – силиката натрия – на физико-механические характеристики бетонов. Добавление этого модификатора снижает прочность (в несколько раз), но одновременно уменьшает водопоглощение на 8–10 % и увеличивает плотность на 7–10 %.

Ключевые слова: серный бетон, сера, кварцевый песок, золошлаковые отходы, силикат натрия.

Введение. Как известно, создание новых видов строительных композиционных материалов, способных длительное время эксплуатироваться в различных агрессивных средах и климатических условиях, является одним из актуальных направлений современного строительного материаловедения. Таким композиционным строительным материалом, в частности, является серный бетон, состоящий из инертных заполнителей (с различной степенью прочности и дисперсности), выполняющих роль внутреннего каркаса, и собственно серы, выступающей в качестве связующей композиции с добавками различных модификаторов [1, 2]. Техническая сера, являющаяся многотоннажным отходом нефтехимической отрасли, обладает выдающимися свойствами, такими как гидрофобность, химическая инертность и низкая температура плавления [3, 4]. В серных бетонах расплавленная сера в виде жидкой фазы проникает в поры заполнителей и кристаллизуется при охлаждении, что способствует образованию прочной структуры [4, 5].

Среди основных преимуществ серных бетонов можно выделить несколько ключевых характеристик, которые делают их особенно привлекательными для использования в строительстве.

Во-первых, серные бетоны обладают способностью быстро наращивать прочность, что является важным фактором в условиях современного строительства, где время играет критическую роль. Это позволяет значительно сократить сроки выполнения строительных работ и повысить общую эффективность процессов.

Во-вторых, серные бетоны демонстрируют высокую морозостойкость, что делает их идеальными для эксплуатации в регионах с суровыми климатическими условиями. Они способны сохранять свои механические свойства даже при низких температурах, что обеспечивает надежность конструкций в зимний период. Кроме того, серные бетоны устойчивы к химическим воздействиям, что позволяет им успешно использоваться в агрессивных средах, таких как промышленные зоны или места с повышенной кислотностью.

Еще одним значительным преимуществом является возможность затвердевания серных бетонов при отрицательных температурах и под водой. Это открывает новые горизонты для их применения в строительстве мостов, дамб и других

объектов, где традиционные бетонные смеси могут не справиться с условиями окружающей среды.

Серные бетоны также характеризуются низким водопоглощением и теплопроводностью. Низкое водопоглощение делает их менее подверженными воздействию влаги и предотвращает образование трещин и разрушений, связанных с замерзанием воды внутри материала. Низкая теплопроводность способствует улучшению теплоизоляционных свойств конструкций, что делает их более энергоэффективными.

Эти характеристики делают серные бетоны эффективными в различных условиях эксплуатации, включая как жилые, так и промышленные здания. Их использование может привести к снижению затрат на обслуживание и ремонт, а также к увеличению срока службы конструкций.

В последние годы наблюдается значительный интерес к серным бетонам, которые разрабатываются с целью решения проблем, связанных с низкой прочностью и долговечностью традиционных цементных бетонов в агрессивных условиях эксплуатации [6, 7]. Исследования показывают, что серные бетоны обладают высокой коррозионной стойкостью, малым водопоглощением и способностью быстро набирать прочность, что делает их конкурентоспособными по сравнению с обычными цементными материалами [4, 8–10].

Тем не менее, несмотря на свои преимущества, серные бетоны имеют ряд недостатков. Одним из основных является их низкая термостойкость и высокая горючесть; при температуре около 120 °С серные бетоны начинают плавиться и выделять двуокись серы, что ограничивает их применение в условиях высокой температуры [11, 12]. Кроме того, серные бетоны могут быть подвержены трещинообразованию при укладке больших объемов из-за термических напряжений [11]. Эти недостатки требуют дальнейшего изучения и модификации составов серного бетона для улучшения его эксплуатационных характеристик.

Современные исследования направлены на использование различных активированных наполнителей для улучшения свойств серного бетона. Например, учеными [9] исследовано влияние активированных наполнителей на прочность и устойчивость серного полимерного бетона, выявив возможность значительного улучшения его характеристик. Также рассматриваются возможности применения отходов нефтехимической промышленности как наполнителей для серных бетонов, что не только улучшает их свойства, но и способствует утилизации промышленных отходов [13].

Добавление золошлаковых отходов (ЗШО) может существенно повысить эксплуатационные характеристики серного бетона. Использование ЗШО позволяет уменьшить выделение летучих газов при приготовлении серобетонов в результате связывания части выделяемых газов щелочными компонентами зол. Это особенно важно в контексте повышения устойчивости бетона к агрессивным химическим веществам и воздействиям окружающей среды [14]. Однако в настоящее время недостаточно изучены механизмы взаимодействия ЗШО с серным вяжущим, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований.

Кроме того, использование золошлаковых отходов способствует решению проблемы утилизации техногенных отходов, что является важным аспектом устойчивого развития. В условиях растущих объемов производства таких отходов их переработка и использование в строительстве могут значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, целью данного исследования является разработка состава серного бетона с добавлением отходов промышленности, что позволит не только улучшить физико-механические характеристики материалов, но и решить проблему утилизации промышленных отходов.

Материалы и методы. Для создания композиций серных бетонов в исследовании были использованы следующие материалы:

Техническая сера – отход производства Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода и соответствует требованиям ГОСТ 127.1-93. По химическому составу отход представляет собой товарный продукт, содержащий 99,9 % серы.

Строительный кварцевый песок Камско-Устьинского месторождения Республики Татарстан с модулем крупности 2,7, соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014.

Золошлаковые отходы (ЗШО), применяемые в качестве наполнителя, получены от Казанской ТЭЦ-2 и соответствуют требованиям ГОСТ 25592-2019. Химический состав ЗШО (масс. %): SiO_2 – 47,7-52,2; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – 21,24-25,28; Fe_2O_3 – 5,2-5,9; $\text{CaO} + \text{MgO}$ – 4,3; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ – 1,84-19,03. Средняя влажность ЗШО составляет 25–28 %, объемная насыпная плотность в сухом состоянии 2200 кг/м³, удельная поверхность 2890 см²/г.

Образцы серных бетонов были созданы с применением технологии, известной как «горячая» технология. В процессе их производства все исходные материалы – сера, кварцевый песок и ЗШО – предварительно нагревались до темпера-

туры около 140 ± 5 °С перед тем, как смешиваться в заданных пропорциях. Такой метод позволяет расплавить серу, что делает ее более удобной для дальнейшей обработки и обеспечивает лучшую адгезию между компонентами.

После этого горячая смесь серобетона заливается в разогретые до температуры 140 ± 5 °С металлические формы размером $20 \times 20 \times 20$ мм. После заливки образцы проходят процесс застывания и кристаллизации при комнатной температуре, что способствует образованию прочной структуры бетона. Кристаллизация образцов серных бетонов происходит в процессе их твердения при охлаждении расплавленной серы, которая затвердевает и образует прочную структуру.

В ходе исследования были изготовлены и проанализированы композиции серных бетонов,

состоящие из пятидесяти различных вариантов с соотношением компонентов «сера : кварцевый песок : ЗШО». Содержание кварцевого песка и ЗШО в образцах варьируется от 0 до 70 %. 25 композиций дополнительно содержат модификатор – силикат натрия Na_2SiO_3 (жидкое натриевое стекло), соответствующий требованиям ГОСТ 13078-2021.

Испытания на прочность при сжатии образцов композиций серных бетонов проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 на лабораторном гидравлическом прессе ПСУ-10. Плотность образцов определялась согласно ГОСТ 12730.1-2020, а водопоглощение – по стандарту ГОСТ 12730.3-2020.

Основная часть. Для изучения физико-механических характеристик серных бетонов была оценена прочность на сжатие образцов (рис. 1).

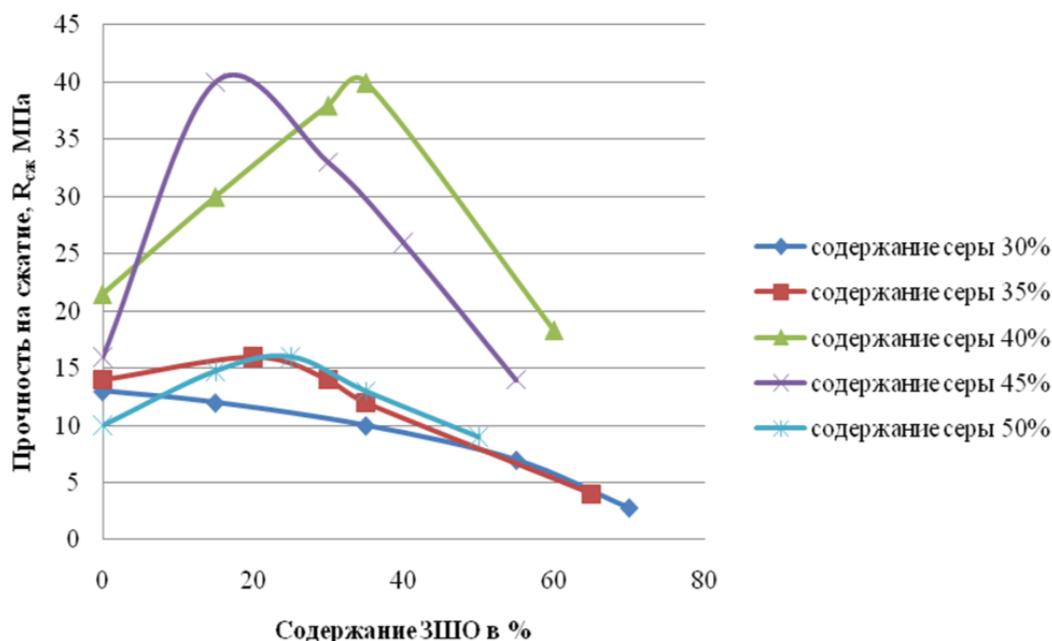


Рис. 1. Зависимость изменения прочности на сжатие серных бетонов от содержания ЗШО в образцах

Оптимальное содержание технической серы в композициях, содержащих кварцевый песок и ЗШО, для достижения высоких прочностных показателей составляет 40–45 % по массе (рис. 1). Эти пропорции обеспечивают эффективное связывание компонентов и формирование прочной структуры бетона. В то же время содержание серы менее 40 и более 45 %, в рамках изученного диапазона 30–50 %, не обеспечивает необходимую прочность для строительных материалов.

Следует отметить, что в научной литературе вопрос о содержании серы в бетонных композициях остается предметом активного обсуждения. Различные исследования показывают широкий диапазон оптимального содержания серы: от 10–15 % по массе до более высоких значений – до 50 %. Так, согласно различным источникам, оптимальное содержание серы в бетоне составляет

10–15% по массе, в других работах [15, 16] – 16 %, [17] – 21 %, [18] – 25 %, [19] – менее 50 %, а согласно [4] – от 30 до 50 %.

Применение двух видов заполнителей с различной степенью дисперсности – кварцевого песка и золошлаковых отходов – приносит серным бетонам ряд преимуществ. Когда ЗШО с высокой дисперсностью добавляются к кварцевому песку с более крупными зёрнами, мелкие частицы ЗШО эффективно заполняют пустоты между большими зёрнами песка. Это способствует уплотнению смеси и улучшает ее общую структуру. Пористость бетона является ключевым фактором, который непосредственно влияет на его прочность и долговечность. Чем больше пустот присутствует в материале, тем ниже его прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

При добавлении расплава серы в смесь песка и ЗШО расплав проникает в оставшиеся микропустоты. Этот процесс способствует формированию более упорядоченной структуры серного бетона и значительно улучшает его физико-механические свойства. Однако стоит отметить, что с

увеличением доли ЗШО в композициях наблюдается значительное снижение прочности на сжатие образцов бетонов в связи с ухудшением взаимодействия между компонентами смеси (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики композиций серных бетонов

№ композиции	Состав, мас. %			Прочность на сжатие, МПа	Плотность, г/см ³	Водопоглощение, % по массе
	сера	песок	ЗШО			
1	30	70	0	13	2,20	1,60
2		55	15	12	1,90	2,80
3		35	35	10	1,60	8,00
4		15	55	7	1,35	14,50
5		0	70	3	1,24	19,66
6	35	65	0	14	1,95	0,73
7		45	20	16	2,20	0,60
8		35	30	14	2,15	0,70
9		30	35	12	2,10	0,90
10		0	65	4	1,38	8,61
11	40	60	0	22	2,10	0,82
12		45	15	30	2,20	0,55
13		30	35	36	2,25	0,49
14		25	40	40	2,31	0,53
15		0	60	18	1,62	3,43
16	45	55	0	16	2,10	0,84
17		40	15	40	2,28	0,64
18		25	30	33	2,22	0,50
19		15	40	26	2,10	0,55
20		0	55	14	1,67	2,46
21	50	50	0	10	2,10	1,84
22		35	15	15	2,08	0,80
23		25	25	16	2,03	0,60
24		15	35	13	1,95	0,70
25		0	50	9	1,76	0,86

Среди всех исследованных композиций серных бетонов наилучшие прочностные характеристики были продемонстрированы эмпирически подобранными композициями № 14 и № 17. Композиция № 5 показала наименьшие значения прочности на сжатие среди всех исследованных образцов № 1-25.

Снижение прочности также фиксируется при увеличении доли кварцевого песка в составах композиций в связи с увеличением доли крупнодисперсного заполнителя в смесях, что приводит к образованию пустот в структуре бетона.

Зависимости изменения плотности от содержания ЗШО, представлены на рис. 2.

Композиции с низкими прочностными характеристиками, содержащие максимальное количество ЗШО, демонстрируют наименьшие значения плотности в исследуемом диапазоне (рис. 2). Это может быть связано с тем, что добавление значительного количества ЗШО приводит

к увеличению пористости материала, что негативно сказывается на его прочностных свойствах.

Следует отметить, что серные бетоны, не содержащие ЗШО, имеют повышенные показатели плотности образцов, как показано на рис. 2 и в табл. 1. В композициях 1, 6, 11, 16 и 21 пустоты между зернами песка заполняются расплавленной серой, но ее кристаллизация увеличивает хрупкость и снижает прочность связей с песком. При этом изменение содержания серы практически не влияет на плотность бетонов.

Зависимости изменения водопоглощения от содержания ЗШО представлены на рис. 3.

Относительно высокие показатели водопоглощения наблюдаются у композиций с низкими прочностными характеристиками и плотностью. Эта тенденция особенно ярко проявляется в образцах, содержащих максимальное количество ЗШО, которые имеют высокую степень дисперсности. Подобное поведение также наблюдается у

серных композиций с высоким содержанием кварцевого песка, как указано в табл. 1.

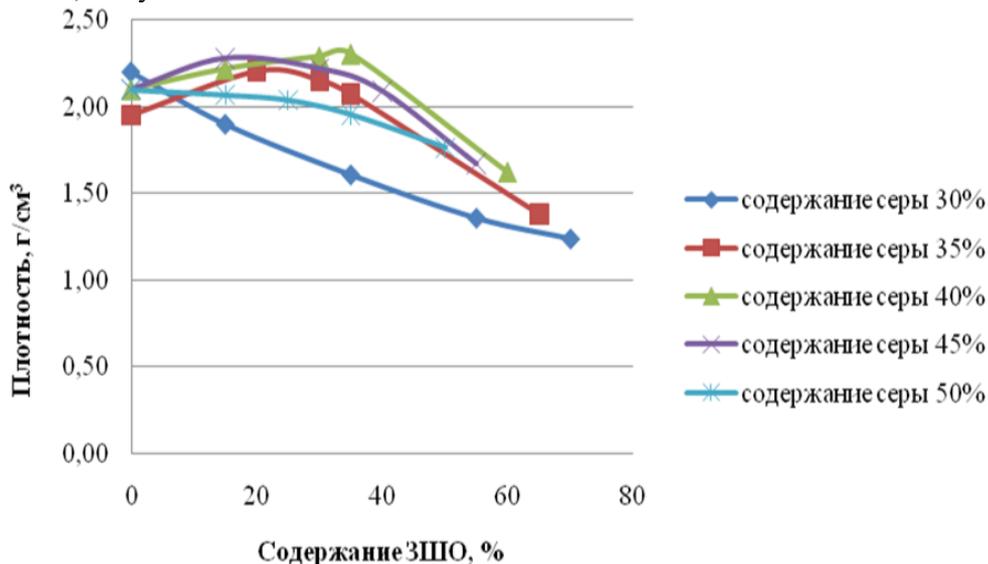


Рис. 2. Зависимость изменения плотности серных бетонов от содержания ЗШО в образцах

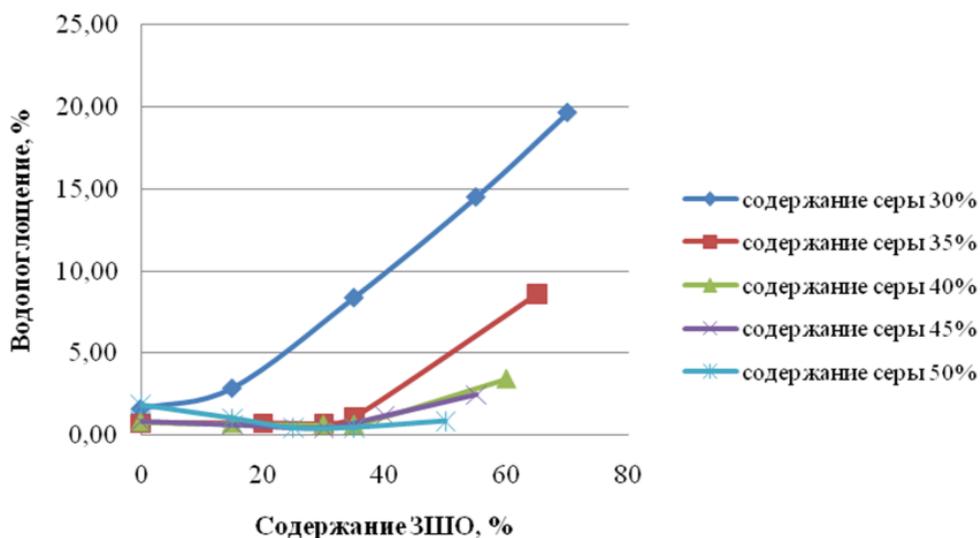


Рис. 3. Зависимость изменения водопоглощения серных бетонов от содержания ЗШО в образцах на шестые сутки проведения испытаний

Анализ экспериментальных данных показывает, что композиция № 5, обладающая наименьшей прочностью на сжатие среди всех исследованных образцов в диапазоне от № 1 до № 25, также имеет самое высокое значение водопоглощения среди всех серных бетонов.

Увеличение пористости связано с введением большого количества заполнителя с высокой степенью дисперсности, ограничивающим формирование более упорядоченной структуры серного бетона, что негативно влияет как на плотность (рис. 2), так и на водопоглощение (рис. 3).

Для улучшения свойств серных бетонов в их состав часто вводят различные модификаторы или активаторы. Эти добавки могут значительно изменить физико-механические характеристики бетона, улучшая его прочность и устойчивость к

внешним воздействиям [1, 20]. В работе в качестве модификатора серных бетонов использован силикат натрия (жидкое стекло) широко применяющийся в строительном материаловедении с целью модификации свойств материалов. При введении модификатора жидкого стекла вязкость серного расплава несколько понижается в широком температурном интервале, что свидетельствует о существовании короткоцепных радикалов и отсутствии полимеризации даже при более высоких температурах. Таким образом, происходит повышение пропитывающей способности расплава в более широком температурном интервале и на поверхности бетона формируется более плотный защитный слой [20].

Зависимости изменения прочности на сжатие серных бетонов с модификатором силикатом натрия показаны на рис. 4

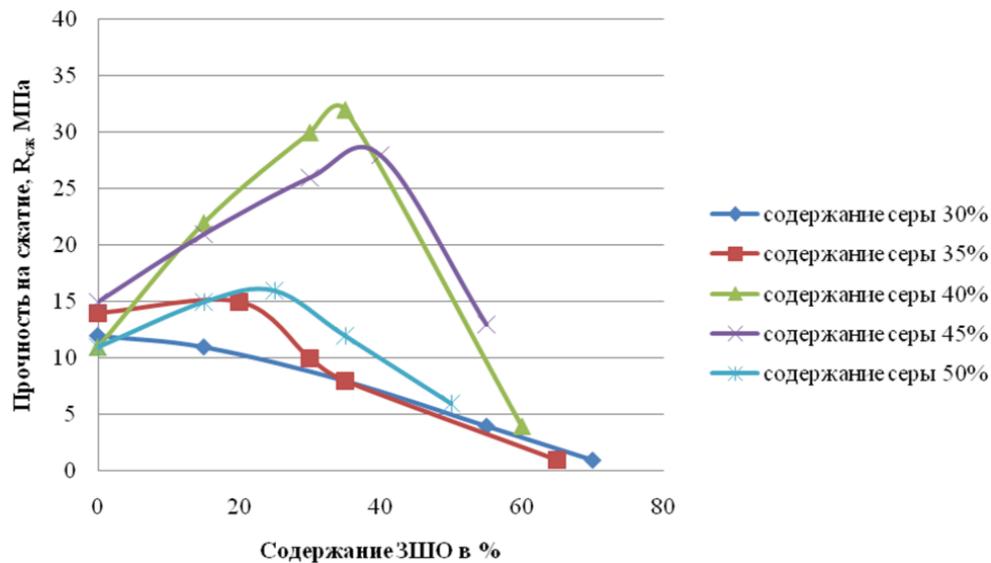


Рис. 4. Зависимость изменения прочности на сжатие серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗПО в образцах

Как и ожидалось, с увеличением содержания ЗПО в составе композиций наблюдается резкое снижение прочности на сжатие образцов бетонов, что подтверждается данными табл. 2. Это снижение прочности также фиксируется при увеличении доли кварцевого песка в составах, что

дополнительно подтверждает взаимосвязь между составом бетона и его прочностными характеристиками. В результате модифицированные композиции № 30 и 35 оказались с наименьшей прочностью на сжатие среди всех исследованных серных бетонов в диапазоне от № 1 до № 50.

Таблица 2

Физико-механические характеристики композиций серных бетонов с добавлением Na_2SiO_3

№ композиции	Состав, мас. %			Прочность на сжатие, МПа	Плотность, г/см ³	Водопоглощение, % по массе
	сера	песок	ЗПО			
26	30	70	0	12	2,40	1,50
27		55	15	11	2,05	2,50
28		35	35	8	1,75	7,70
29		15	55	4	1,45	13,20
30		0	70	1	1,30	17,69
31	35	65	0	14	2,13	0,67
32		45	20	15	2,40	0,45
33		35	30	10	2,30	0,55
34		30	35	5	2,20	0,75
35		0	65	1	1,48	8,05
36	40	60	0	11	2,23	0,77
37		45	15	22	2,35	0,65
38		30	30	30	2,40	0,51
39		25	35	32	2,50	0,57
40		0	60	4	1,74	3,26
41	45	55	0	15	2,19	0,82
42		40	15	21	2,50	0,80
43		25	30	26	2,37	0,65
44		10	45	28	2,45	0,70
45		0	55	13	1,79	2,24
46	50	50	0	11	2,21	1,75
47		35	15	15	2,20	0,90
48		25	25	16	2,18	0,55
49		15	35	12	2,12	0,65
50		0	50	6	1,92	0,82

Примечание: Na_2SiO_3 вводилось сверх 100 % в количестве 1 % от массы серы.

Сравнение прочностных характеристик модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций, в которых модификатор не использовался, показало, что добавление силиката натрия значительно снижает

прочность бетонов – это снижение наблюдается в несколько раз.

Сравнительные данные о влиянии содержания ЗШО на плотность серных бетонов представлены на рис. 5.

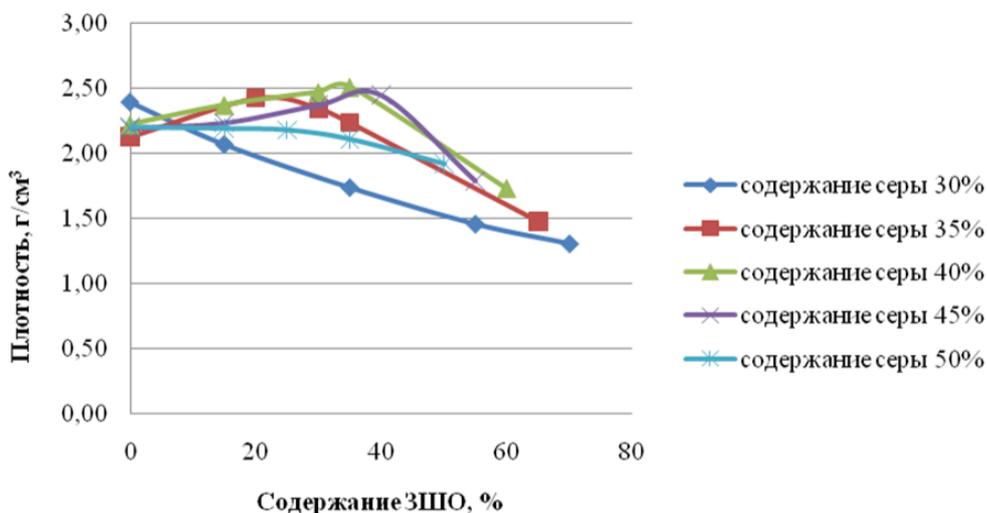


Рис. 5. Зависимость изменения плотности серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗШО в образцах

Композиция № 39, обладающая наивысшей прочностью на сжатие среди всех исследованных образцов, демонстрирует максимальное значение плотности – 2,51 г/см³ в диапазоне композиций № 26-50, как показано на рис. 5. Это свидетельствует о том, что данная композиция не только обладает высокими прочностными характеристиками, но и высокой плотностью, что может быть связано с оптимальным соотношением компонентов в ее составе. Высокая плотность указывает на более компактную структуру бетона, что способствует его прочности и устойчивости к внешним воздействиям.

Низкая плотность этих образцов указывает на то, что увеличение доли ЗШО более 45% в составе композиций негативно сказывается на их плотности (табл. 2). Это может быть объяснено тем, что добавление значительного количества ЗШО приводит к увеличению пористости бетона, так как мелкие частицы заполнителя препятствуют формированию более упорядоченной структуры серного бетона.

Аналогично, серные бетоны, которые не содержат ЗШО, характеризуются повышенными показателями плотности образцов. Это может быть связано с тем, что в таких композитах пустоты между зёрнами песка заполняются расплавленной серой.

Таким образом, модифицированная композиция № 30, которая имеет минимальные показатели прочности на сжатие среди всех исследованных серных бетонов, также демонстрирует наименьшую плотность среди композиций № 26-50. Это подчеркивает важность выбора

компонентов и их соотношений для достижения желаемых физико-механических свойств. Правильное сочетание серы, кварцевого песка и ЗШО является ключевым фактором для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик бетона.

Сравнение плотности модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций без модификатора показало, что добавление силиката натрия увеличивает плотность образцов на 7-10%. Это может быть связано с тем, что силикат натрия способствует улучшению структуры бетона и заполняет пустоты между частицами заполнителей.

Зависимости изменения водопоглощения от содержания ЗШО представлены на рис. 6.

Композиция № 39 серных бетонов с наивысшей прочностью на сжатие также имеет самое низкое водопоглощение – 0,57 % (рис. 6). Это свидетельствует о том, что высокая прочность на сжатие может быть связана с более плотной структурой бетона, которая препятствует проникновению влаги. В то же время композиции с низкими прочностными характеристиками, содержащие максимальное количество ЗШО, показывают более высокие показатели водопоглощения в исследуемом диапазоне, что подтверждается данными табл. 2. Подобная тенденция наблюдается и у серных композиций с высоким содержанием кварцевого песка.

Кроме того, стоит отметить, что модифицированная композиция № 30, имеющая минималь-

ные показатели прочности на сжатие, характеризуется самым высоким значением водопоглощения среди композиций № 26-50.

Сравнение водопоглощения модифицированных серных бетонов с аналогичными данными для композиций без модификатора показало, что добавление силиката натрия снижает водопоглощение образцов на 8-10%.

Таким образом, анализируя полученный массив физико-механических данных образцов

композиций № 26-50, содержащих силикат натрия, можно наблюдать те же закономерности, отмеченные выше для не модифицированных серных бетонов (композиции № 1-25).

Исследования показывают, что, согласно ГОСТ Р 59613-2021, разработанные композиции № 14, 17 и 39 могут быть отнесены к серобетонным смесям средней плотности для тяжелого серобетона.

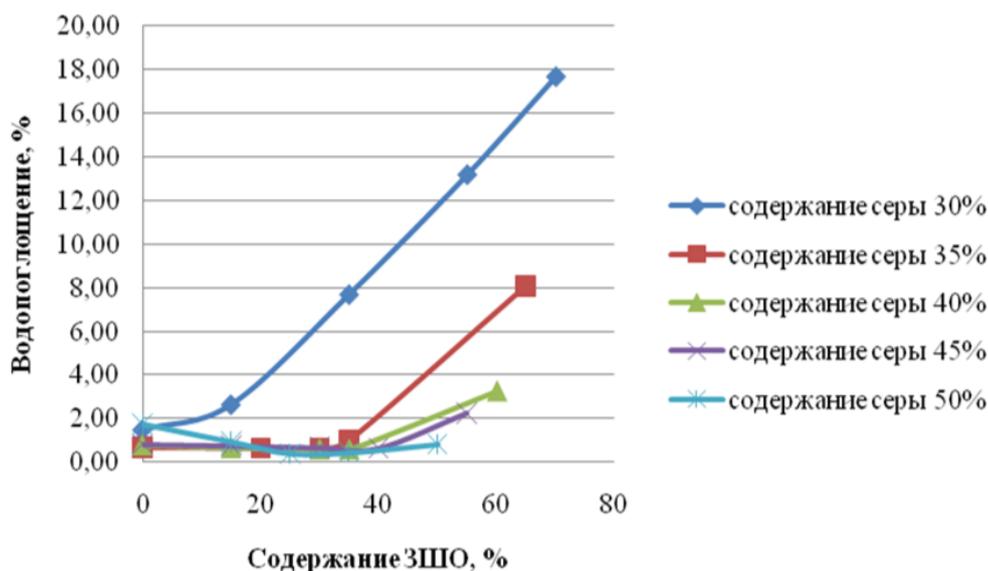


Рис. 6. Зависимость изменения водопоглощения серных бетонов с силикатом натрия от содержания ЗШО в образцах на шестые сутки проведения испытаний

Выводы.

Оптимальное содержание серы в композициях для достижения максимальной прочности на сжатие составляет 40–45 % по массе. При этом увеличение доли ЗШО или кварцевого песка приводит к снижению прочности, что связано с увеличением пористости и образованием пустот в структуре бетона.

Среди пятидесяти исследованных композиций серных бетонов наилучшие прочностные характеристики демонстрируют эмпирически подобранные смеси, содержащие от 40 до 45 % серы, от 25 до 40 % кварцевого песка и от 15 до 35 % ЗШО.

Применение двух типов заполнителей с различной дисперсностью (кварцевый песок и ЗШО) способствует улучшению структуры серного бетона. Мелкие частицы ЗШО заполняют промежутки между крупными зёрнами песка, что ведет к уплотнению смеси и повышению прочности.

Высокие значения водопоглощения наблюдаются у композиций с низкими прочностными характеристиками, особенно при высоком содержании ЗШО. Это указывает на негативное влия-

ние увеличенной пористости на физико-механические свойства бетона, что может привести к ухудшению его долговечности.

Введение модификаторов, таких как силикат натрия, позволяет значительно изменить физико-механические характеристики серных бетонов, уменьшая водопоглощение на 8–10 % и увеличивая плотность на 7–10 % по сравнению с образцами без модификатора. Однако увеличение содержания ЗШО в модифицированных композициях также приводит к снижению прочности на сжатие.

Результаты исследований открывают новые возможности для применения серных бетонов в строительстве и других отраслях, где требуются материалы с высокой прочностью и низким водопоглощением, таких как фундаментных и стеновых блоков, фундаментных плит и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yusupova A., Ahmetova R., Bobrishev A. Sulfur concrete made from sulfur waste of petrochemical plants and silica containing compounds // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2333–2336. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.682

2. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Sulfur concrete for the construction industry: A sustainable development approach. Fort Lauderdale, FL, USA: J. Ross Publishing Inc. 2010. 448 p.
3. Усов Б.А. Технология и применение серных бетонов // Системные технологии. 2015. № 17. С. 56–69.
4. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии. Технические науки. 2018. № 11. С. 43–47.
5. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V., Vatin N. A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712
6. Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.Dj., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 3926–3934. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024
7. Shin M., Kim K., Gwon Seong-Woo, Cha S. Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 69. Pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061
8. Yang Ch., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S. An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. Pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.046
9. Moon Ju., Kalb P.D., Milian L., Northrup P.A. Characterization of a sustainable sulfur polymer concrete using activated fillers // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 67. Pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.002
10. Mohammed Sh., Poornima V. Strength and durability study of sulphur concrete with replaced fine aggregate // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 11. Pp. 23888–23897. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.181
11. Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S. Potential for producing concrete blocks using sulphur polymeric concrete in Kuwait // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2019. Vol. 31. Pp. 327–331. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004
12. Khademi A.Gh., Sar H.I.K. Comparison of sulfur concrete, cement concrete and cement-sulfur concrete and their properties and application // *Current World Environment*. 2015. Vol. 10. Sp. Pp. 201–207. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.26
13. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2009. Vol. 31. Pp. 186–194.
14. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии. Технические Науки. 2018. № 11. С. 43–47.
15. Balabanov V., Baryshok V., Epishkin N. Concrete based on sulfur binder being modified with inorganic additives // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 212. 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201821201013
16. Занг Ле Ньят Тхюи, Епишкин Н.А., Балабанов В.Б., Барышок В.П. Высокопрочные и морозостойкие бетоны с применением технической серы // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Том 8. № 3. С. 122–129. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-122-129
17. Сафаров А.Х., Московец А.В., Федорова Ю.А., Ягафарова Г.Г., Акчурина Л.Р. Экологически безопасный состав серобетона // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 11. С. 199–200.
18. Занг Ле Ньят Тхюи, Епишкин Н.А., Балабанов В.Б., Барышок В.П. Высокопрочные бетоны на основе серного вяжущего с применением модификаторов // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. Том 7. № 4. С. 155–161. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-4-155-161
19. Токтибаева Х.Р., Бекжигитова К.А., Джаппарова М.Т., Сатывалдиев А.С., Имангалиев Т.А., Серкебаев М.К. Получение серного бетона из комовой серы – отхода добычи углеводородного сырья // *Фундаментальные исследования. Химические науки*. 2015. № 2 (часть 16). С. 3527–3531.
20. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Пятко Ю.Н., Ефимова В.А., Ахметова А.Ю., Диргамова Л.Р. Электрофильные и нуклеофильные модификаторы для повышения пропитывающих свойств серного расплава в технологии водостойких теплоизоляционных материалов // *Вестник технологического университета*. 2014. Т. 17. № 7. С. 66–68.

Информация об авторах

Сагадеев Евгений Владимирович, доктор химических наук, профессор. E-mail: sagadeev@list.ru. Общество с ограниченной ответственностью «Коррозионное тестирование строительных материалов». Россия, 420140, Казань, ул. Минская, д. 52, офис 110.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор заведующая кафедрой Строительства и городского хозяйства. E-mail: sgx@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ибрагимов Руслан Абдирашитович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Технологии строительного производства. E-mail: rusmag007@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Сагадеев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры Инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования. E-mail: v.sagadeev@mail.ru. Казанский национальный исследовательский технологический университет. Россия, 420015, Казань, ул. К. Маркса, д. 68.

Поступила 18.01.2025 г.

© Сагадеев Е.В., Сулейманова Л.А., Ибрагимов Р.А., Сагадеев В.В., 2025

^{1,*}Sagadeev E. V., ²Suleymanova L. A., ³Ibragimov R. A., ⁴Sagadeev V. V.

¹LLC «Korrosionnoe testirovanie stroitel'nykh materialov»

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

³Kazan State University of Architecture and Engineering

⁴Kazan National Research Technological University

E-mail: sagadeev@list.ru

OBTAINING AND STUDYING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SULFUR CONCRETE COMPOSITIONS

Abstract: *The development of new types of building materials that can function effectively for a long time in various aggressive conditions and climatic zones is one of the most important areas in modern construction materials science. As part of the study, fifty sulfur concrete compositions based on petrochemical and thermal power industry waste were developed using the "hot" technology method. In the process, the physical and mechanical properties of these compositions were studied, including compressive strength, density and water absorption. To achieve optimal characteristics of sulfur concrete, it is necessary to include three main components: technical sulfur, quartz sand and ash and slag waste with varying degrees of dispersion. The optimal sulfur content in the compositions should be 40 % or 45 % by weight to ensure maximum physical and mechanical properties. The study revealed that an increase in the proportion of ash and slag waste or quartz sand leads to a sharp decrease in the strength of the samples. Increasing the proportion of ash and slag waste in sulfur concretes leads to a significant increase in water absorption and a decrease in density, which is explained by an increase in the porosity of the samples. The effect of the modifier - sodium silicate - on the physical and mechanical properties of concrete was also studied. Adding this modifier reduces strength (several times), but at the same time reduces water absorption by 8–10 % and increases density by 7–10 %. In conclusion, the results of the study emphasize the importance of the composition for the physical properties of sulfur concretes and open up opportunities for their use in construction.*

Keywords: *sulfur concrete, sulfur, quartz sand, ash and slag waste, sodium silicate.*

REFERENCES

1. Yusupova A., Akhmetova R., Bobrishev A. Sulfur concrete made from sulfur waste of petrochemical plants and silica containing compounds. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. Pp. 2333–2336. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.682

2. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Sulfur concrete for the construction industry: A sustainable development approach. Fort Lauderdale, FL, USA: J. Ross Publishing Inc. 2010. 448 p.

3. Usov B.A. Technology and application of sulfur concrete [Tekhnologiya i primeneniye sernykh betonov]. *System technologies*. 2015. No. 17. Pp. 56–69. (rus)

4. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Yusupova A.A. Utilization of ash and slag waste from thermal power plants in the manufacture of sulfur concrete in the presence of phosphorus chloride [Utilizatsiya zoloshlakovykh othodov TEC pri izgotovlenii sernykh betonov v prisutstvii hlorida

fosfora]. Modern science-intensive technologies. Engineering sciences. 2018. No. 11. Pp. 43–47. (rus)

5. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V., Vatin N. A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712

6. Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.Dj., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 3926–3934. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024

7. Shin M., Kim K., Gwon Seong-Woo, Cha S. Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 69. Pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061

8. Yang Ch., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S. An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. Pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.046

9. Moon J., Kalb P.D., Milian L., Northrup P.A. Characterization of a sustainable sulfur polymer concrete using activated fillers. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 67. Pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.002

10. Mohammed Sh., Poornima V. Strength and durability study of sulfur concrete with replaced fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 11. Pp. 23888–23897. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.181

11. Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S. Potential for producing concrete blocks using sulfur polymeric concrete in Kuwait. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2019. Vol. 31. Pp. 327–331. DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004

12. Khademi A.Gh., Sar H.I.K. Comparison of sulfur concrete, cement concrete and cement-sulfur concrete and their properties and application. *Current World Environment*. 2015. Vol. 10. Sp. Pp. 201–207. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.26

13. Mohamed A.M.O., El-Gamal M. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 31. 2009. Pp. 186–194.

14. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Yusupova A.A. Utilization of ash and slag waste

from thermal power plants in the manufacture of sulfur concretes in the presence of phosphorus chloride [Utilizatsiya zoloshlakovykh othodov TEC pri izgotovlenii sernykh betonov v prisutstvii hlorida fosfora]. Modern science-intensive technologies. Technical Sciences. 2018. No. 11. Pp. 43–47.

15. Balabanov V., Baryshok V., Epishkin N. Concrete based on sulfur binder being modified with inorganic additives. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 212. 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201821201013

16. Giang Le Nhat Thuy, Epishkin N.A., Balabanov V.B., Baryshok V.P. High-strength and frost-resistant concretes using technical sulfur [Vysokoprochnye i morozostojkie betony s primeneniem tekhnicheskoy sery]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2018. Vol. 8. No. 3. Pp. 122–129. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-122-129 (rus)

17. Safarov A.Kh., Moskovets A.V., Fedorova Yu.A., Yagafarova G.G., Akhchurina L.R. Environmentally friendly composition of sulfur concrete [Ekologicheski bezopasnyj sostav serobetona]. *Bulletin of the Technological University*. 2016. Vol. 19. No. 11. Pp. 199–200. (rus)

18. Zang Le Nhat Thuy, Epishkin N.A., Balabanov V.B., Baryshok V.P. High-strength concretes based on sulfur binder with the use of modifiers [Vysokoprochnye betony na osnove sernogo vyazhushchego s primeneniem modifikatorov]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 155–161. DOI: 10.21285/2227-2917-2017-4-155-161 (rus)

19. Toktibaeva Kh.R., Bekzhigitova K.A., Dzhabbarova M.T., Satyvaldiev A.S., Imangaliev T.A., Serkebaev M.K. Obtaining sulfur concrete from lump sulfur – a waste product of hydrocarbon raw materials extraction [Poluchenie sernogo betona iz komovoj sery – othoda dobychi uglevodородnogo syr'ya]. *Fundamental research. Chemical sciences*. 2015. No. 2 (part 16). Pp. 3527–3531. (rus)

20. Medvedeva G.A., Akhmetova R.T., Pyatko Yu.N., Efimova V.A., Akhmetova A.Yu., Dirgamova L.R. Electrophilic and nucleophilic modifiers for improving the impregnating properties of sulfur melt in the technology of waterproof thermal insulation materials [Elektrofil'nye i nukleofil'nye modifikatory dlya povysheniya propityvayushchih svojstv sernogo rasplava v tekhnologii vodostojkikh teploizolyacionnykh materialov]. *Bulletin of the Technological University*. 2014. Vol. 17. No. 7. Pp. 66–68. (rus)

Information about the authors

Sagadeev, Evgeniy V. Doctor of Chemical Sciences, Professor. E-mail: sagadeev@list.ru. LLC «Korrosionnoe testirovanie stroitel'nykh materialov». Russia, 420140, Kazan, st. Minskaya, 52, office 110.

Suleymanova, Ludmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction and urban management. E-mail: sgx@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ibragimov, Ruslan A. PhD, Assistant professor, Head of the Department of Construction production technologies. E-mail: rusmag007@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Sagadeev, Vladimir V. PhD, Assistant professor, Department of Engineering computer graphics and computer-aided design. E-mail: v.sagadeev@mail.ru. Kazan National Research Technological University. Russia, 420015, Kazan, st. Karl Marx, 68.

Received 18.01.2025

Для цитирования:

Сагадеев Е.В., Сулейманова Л.А., Ибрагимов Р.А., Сагадеев В.В. Получение и исследование физико-механических свойств композиций серных бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19

For citation:

Sagadeev E.V., Suleymanova L.A., Ibragimov R.A., Sagadeev V.V. Obtaining and studying physical and mechanical properties of sulfur concrete compositions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No.7. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-20-32

Кайс Х.А.

Университет Саны, Республика Йемен

E-mail: hamza.qais@mail.ru

ВЛИЯНИЕ АНТИВСПЕНИВАЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. Известно, что повысить эксплуатационные характеристики возможно за счет управления характером поровой структуры бетона. Одним из известных способов управления поровой структурой является применение антивспенивающих добавок. В работе показано влияние антивспенивателей в бетонах на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ). Выбор бетона для исследования, на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, обусловлен развитием аддитивных технологий. Изучено влияние трех видов антивспенивающих добавок на свойства бетонной смеси из ГЦПВ: подвижность, воздухововлечение и плотность, а также свойства ГЦПВ-бетона – это прочность и коэффициент его размягчения. Для определения поровой структуры применялся метод, основанный на анализе изображений поровой структуры ГЦПВ-бетона.

Установлена прямая зависимость влияния размера и количества пор на прочностные характеристики бетона с антивспенивающими добавками. Получен оптимальный состав ГЦПВ-смеси с антивспенивающей добавки на основе модифицированного полиэфиром силикона, который позволяет повысить: подвижность на 13,5 %, плотность на 2 %, прочность при сжатии на 15 % и при изгибе на 34% относительно контрольного состава.

Ключевые слова: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, антивспенивающие добавки, минеральные масла, жирный спирт, силикон, модифицированный полиэфиром, подвижность, воздухововлечение, плотность, прочность, коэффициент размягчения.

Введение. Бетон является одним из наиболее широко используемых материалов в области промышленного и гражданского строительства во всем мире [1–3]. С развитием аддитивных технологий вновь появился интерес к применению бетона на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ) которые позволяют в значительной степени снизить стоимость готовой продукции и соответственно повысить ее конкурентоспособность [4].

При этом, необходимо отметить и отрицательный факт – меньшую долговечность ГЦПВ-бетонов в сравнении с цементными.

Как известно, ключевыми параметрами, определяющими долговечность, являются водонепроницаемость и водостойкость [5]. Для повышения этих показателей применяют: минеральные наполнители с пуццолановым эффектом [6–8], пластифицирующие добавки [9–12], гидрофобизирующие добавки [13, 14], кристаллизационные добавки [15] и др.

В работах [16, 17] показано влияние поровой структуры на долговечность бетона. Установлено, что поры диаметром менее 20 нм не влияют на прочность бетона, отрицательное влияние начинается с пор размером от 50 до 200 нм, а поры более 200 нм значительно сокращают срок службы бетона.

Авторы [18, 19] установили, что при увеличении содержания воздуха на 1% прочность на

сжатие снижается на 4–6%, также отмечается прямая зависимость скорости карбонизации от увеличения воздухововлечения. Авторы [20, 21] отмечают, что поликарбоксилатные суперпластификаторы кроме повышения водоредуцирующих свойств приводят к повышению воздухововлечения, что негативно может отразиться на высокопрочных бетонах.

Одним из известных способов управления поровой структурой бетона является применение антивспенивающих добавок [22]. Антивспенивающая добавка (АД) – снижать поверхностное натяжение воды, раствора, суспензии и т. д., что эффективно предотвращает образование пены и уменьшает или устраняет исходную пену [23].

По действию АД на механизм разрушения пены можно разделить на две категории: быстрые и медленные. АД с медленным эффектом – представляют собой масла, которые проникают в пленку пены [24]. Эффективны АД в самоуплотняющемся бетоне, которые приводят к уменьшению размера пор и положительно влияют на его реологию [25, 26].

Таким образом, понимание поровой структуры бетонов не только способствует разработке более эффективных строительных материалов, но также позволяет оптимизировать процессы производства и улучшить экологические характеристики бетонных конструкций [17].

Однако, в литературе мало информации о влиянии антивспенивающих добавок на свойства ГЦПВ-бетонов.

Исходя из этого, в данной работе исследовано влияние трех видов антивспенивающих добавок с разным механизмом действия на свойства бетонной смеси на основе ГЦПВ: подвижность, воздухововлечение и плотность, а также свойства ГЦПВ-бетона – прочность и коэффициент размягчения.

Материалы и методы. Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие, а также два вида пуццолановых минеральных добавок (природный цеолит и микрокремнезем):

- гипсовое вяжущее (ГВ) марки Г-5 производства ООО «Develop a nation» (Республика Йемен), соответствующего требованиям стандарта EN 13279-1:2008, а физико-механические свойства, которого представлены в табл. 1;

- цементное вяжущее – портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н «Amran cement» (Республика Йемен), удовлетворяющий стандарту ASTM C 150 – TYPE 1, минеральный состав по паспорту качества представлен в табл. 2, а его физико-механические свойства – табл. 3.

Таблица 1

Физико-механические свойства гипсового вяжущего

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Тонкость помола, остаток на сите № 02	%	4,5
2	Нормальная густота	%	55
3	Сроки схватывания: - начало - конец	мин.	6
			12
4	Предел прочности при изгибе: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	2,9
			5,5
5	Предел прочности при сжатии: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	5,35
			13,8
6	Коэффициент размягчения	-	0,31

Таблица 2

Минералогический состав портландцемента

Наименование цемента	Минеральный состав клинкера, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
«Amran cement» (ЦЕМ I 42,5Н)	53,8	20,9	6,4	12,04

Таблица 3

Физико-механические свойства портландцемента

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Истинная плотность	г/см ³	3,0
2	Насыпная плотность	г/см ³	1,25
3	Нормальная густота	%	27–28
4	Сроки схватывания цементного теста: - начало - конец	час-мин	2–55
			3–40
5	Тонкость помола (проход через сит с сеткой № 008)	%	94
6	Предел прочности в возрасте 28 суток: - при сжатии - при изгибе	МПа	48,5
			7,0
7	Прочность при сжатии после пропаривания	МПа	38,4
8	Равномерность изменения объема	-	выдерживает

- микрокремнезем (МК) взят с Саудовского металлургического комбината «BUILMIX». Он представляет собой порошок с частицами сферической формы размером 0,01–0,1 мкм, имеющий удельную поверхность 38000 см²/г (по методу воздухопроницаемости) и пуццолановую активность - 1210 мг/г.

- природный цеолит (ЦЕО) представлял собой мелкозернистый материал светло-зеленого цвета с наибольшим размером фракции 1 мм. Он выпускается предприятием «Yemen zeolite» в г. Сана Республика Йемен. Перед применением цеолит высушивали до постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния с

удельной поверхностью 6500 см²/г (по методу воздухопроницаемости). Его пуццолановая активность по поглощению СаО из насыщенного

известкового раствора составила 815 мг/г. Химические составы ПЦ, МК и ЦЕО и цемента представлены в табл. 41

Таблица 4

Химический состав цемента и АД входящих в составе ГЦПВ

Название вещества	Количество, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ	20,59	63,5	2,94	3,77	–	4,96	–	–	–	1,96
МК	94,49	0,5	0,62	0,1	0,09	0,07	0,7	–	–	–
ЦЕО	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	–

Соотношение компонентов ГЦПВ – гипс: портландцемент: микрокремнезем: цеолит природный = 60:25:10:5 масс. ч.

Для приготовления ГЦПВ-бетона в качестве заполнителя использовали фракционированный песок оптимального состава, подобранный в соответствии с рекомендациями [27]. Соотношение ГЦП-вяжущего к песку (П) принято 1:2. Физические свойства песка представлены в табл. 5.

В качестве суперпластификатора использовали «Master Glenium 112» производства Master Builders Solutions «MBCC-GROUP» (Германия) с оптимальной дозировкой 1,5 % от массы ГЦПВ, оптимальное количество определено в работе [10].

Для выявления общих закономерностей исследованы три вида АД, основные свойства которых представлены в табл.6, химическое строение – на рис.1.

Таблица 5

Показатели фракционированного песка

Содержание фракций, %					Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %
2,5–1,25 мм	1,25–0,63 мм	0,63–0,315 мм	0,315–0,16 мм	< 0,16 мм		
70	15	5	5	5	1665	36,4

Таблица 6

Основные показатели эффективности АД

Маркировка АД	шифр	Основа АД	Цвет	Содержание твердого вещества	pH	Совместимость с водным раствором СП	Плотность, (г/мл)
E-302/E-303/E-304	АД1	минеральное масло	жёлтый	-	5–8	Не растворяется	0,98
AFV-3130	АД2	на основе жирных спиртов	Белый эмульсия	30	6–7	Слабое растворение	0,9~1,1
XJY-8205D	АД3	силикон, модифицированный полиэфиром	Белый порошок	>98.5	6–8	Хорошее растворение	2,5

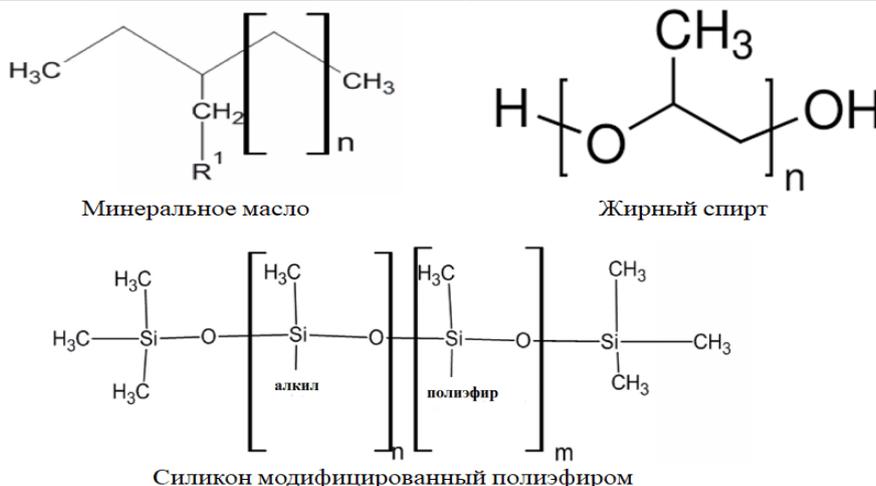


Рис. 1. Структура АД разного типа

Методы испытания. В работе использовались стандартные методики для определения:

- подвижности - по ГОСТ 23789-2018 с использованием прибора Суттарда;

- содержания воздуха в смеси ГЦПВ определяли прибором LC-615A (Sanyo, Япония) в соответствии с ГОСТ 10181-2014.

- прочности при сжатии ГЦПВ-бетона по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах 150*150*150 мм

- водостойкости ГЦПВ-бетона оценивали по коэффициенту размягчения через 24 ч;

- при обработке структуры пор ГЦПВ-бетона использовался метод Фролкина О.А. [28] и программное обеспечение NI Vision Assistant LabVIEW по схеме рис.2.

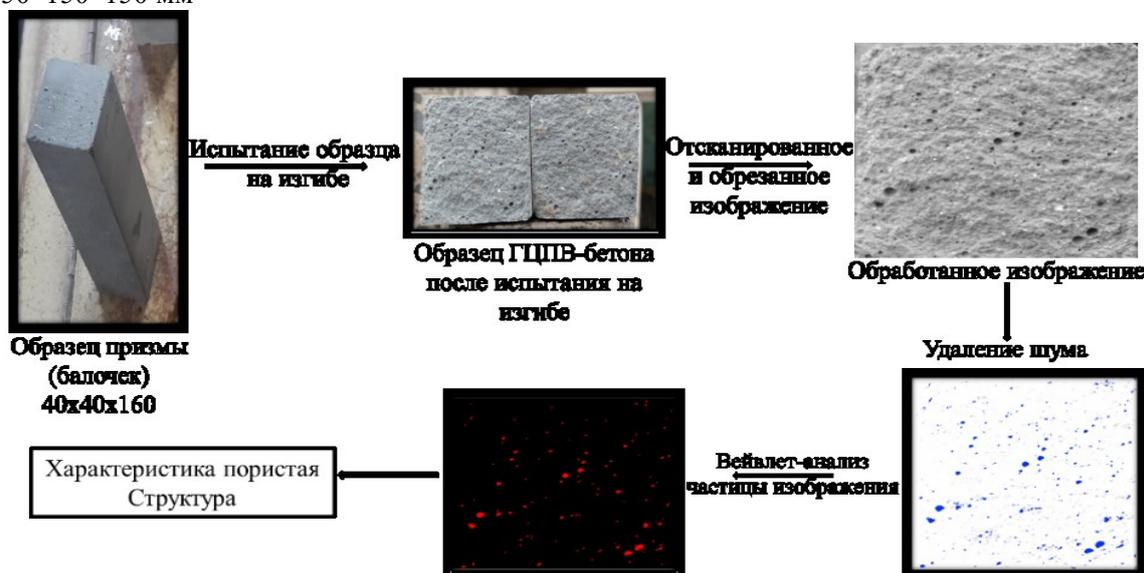


Рис. 2 Схема анализа изображений ГЦПВ-бетона по [28].

Механизм действия АД. АД можно разделить на две категории: быстрые и медленные. АД в зависимости от механизма разрушения пены: медленные АД часто представляют собой масла, которые разрушают пену в течение более длительного периода времени, тогда как быстрые АД обычно представляют собой смешанные агенты, которые проникают в пленку пены. Механизм действия АД (рис. 3) выясняется следующим образом: действующие вещества добавки накапливаются вокруг газового пузыря, вытесняют молекулы ПАВ (а, б). В результате чего АД проникают в пенную пленку и происходит образование мостиков между двумя соседними пенными пленками (в), а толщина пленки ПАВ вокруг пузырьков воздуха уменьшается, при этом внутреннее давление воздушного пузыря использует внутреннее поверхностное натяжение между АД и пенной пленкой в качестве движущей силы, и часть АД расширяется (г). В результате чего пенная пленка разрывается или объединяются с другими, образуя более крупные пузырьки.

кулы ПАВ (а, б). В результате чего АД проникают в пенную пленку и происходит образование мостиков между двумя соседними пенными пленками (в), а толщина пленки ПАВ вокруг пузырьков воздуха уменьшается, при этом внутреннее давление воздушного пузыря использует внутреннее поверхностное натяжение между АД и пенной пленкой в качестве движущей силы, и часть АД расширяется (г). В результате чего пенная пленка разрывается или объединяются с другими, образуя более крупные пузырьки.

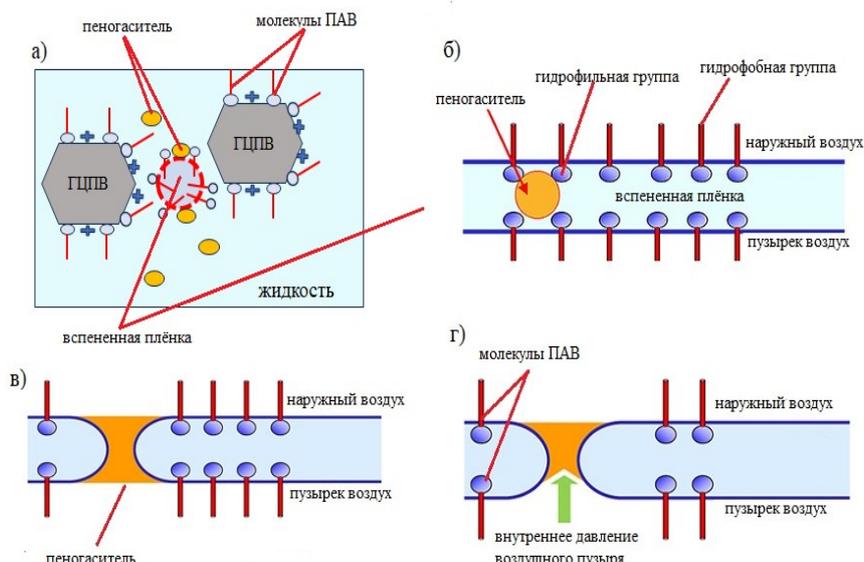


Рис. 3. Механизм действия АД

Результаты и обсуждение. Первоначально было определено содержание воздуха в ГЦПВ-

бетона с АД. Результаты содержания воздуха в ГЦПВ-бетона представлены на рис. 4.

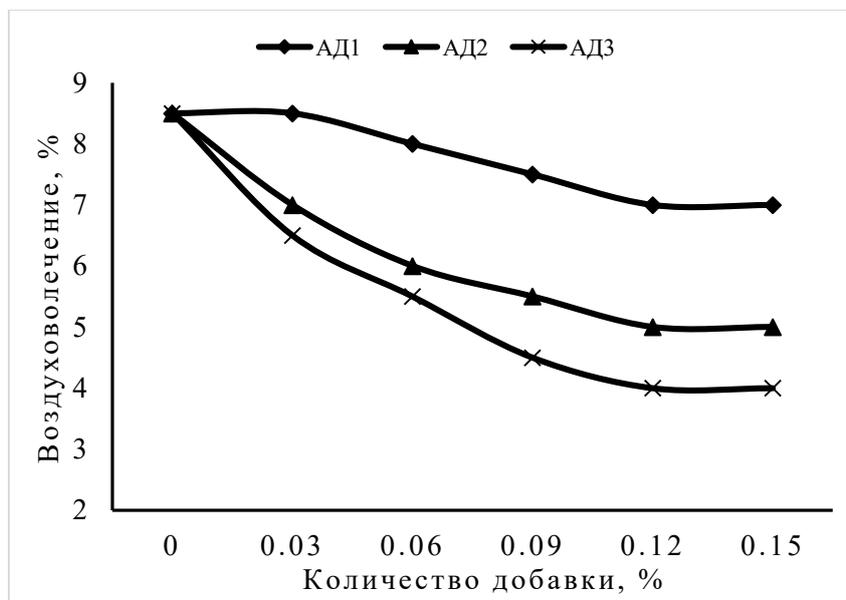


Рис. 4. Влияние пеногасителей на воздуховоление мелкозернистого ГЦПВ-бетона

Из рис. 4 видно, что максимальное снижение воздуховоления происходит при введении АД3 на основе модифицированного полиэфиром силикона. При введении 0,15% АД3 воздуховоление снижается с 8,5% до 4,0 % (снижение на 53%). Наименее эффективный АД1 на основе минерального масла, при дозировке его 0,15% воздуховоление уменьшается на 1%, относительно контрольного состава.

Проведенные исследования влияние АД на сроки схватывания показали (табл.7), что

наибольшим замедляющим эффектом обладает АД1, при его максимальной дозировке (0,15%) начало схватывания замедляется на 6,5 минут, а конец схватывания на 6 минут. При этом АД2 увеличивает время начала схватывания в 1,2-1,3 раза и отодвигает конец схватывания смеси в 1,1 – 1,3 раза по сравнению с бездобавочным составом. АД3 не влияет на сроки схватывания ГЦПВ.

Результаты влияния АД на подвижность ГЦПВ-бетона представлены на рис. 5 и табл. 7.

Таблица 7

Влияние АД на свойства мелкозернистой ГЦПВ-смеси

Шифр АД	Вид АД	Кол-во добавки, % от массы бетона	Диаметр расплыва по Сутгарду, мм	Сроки схватывания, мин.		Коэффициент размягчения, Кр
контрольный		0	185	12,5	15,5	0,89
АД1	Е-302/Е-303/Е-304	0,03	185	12,5	15,5	0,88
		0,06	190	13	16	0,87
		0,09	185	17	23,5	0,85
		0,12	180	18	23	0,84
		0,15	175	18,5	22	0,82
АД2	AFV-31300	0,03	185	12,5	15,5	0,90
		0,06	195	13	15	0,91
		0,09	200	13,5	16,5	0,92
		0,12	205	14	16,5	0,91
		0,15	195	14	17	0,89
АД3	XJY-8205D	0,03	185	13	16	0,91
		0,06	195	13,5	16	0,93
		0,09	205	12	15	0,94
		0,12	210	12,5	15	0,92
		0,15	200	13	16,5	0,9

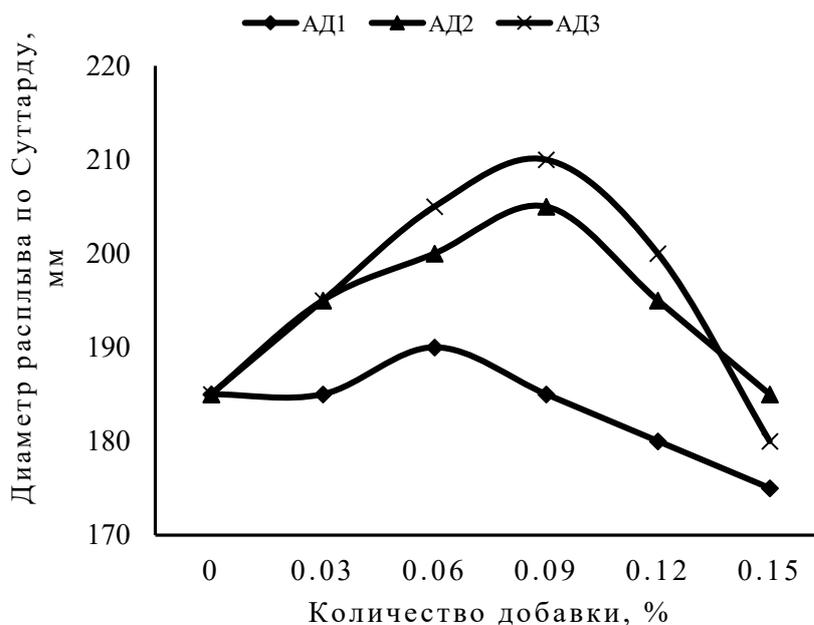


Рис. 5. Подвижность мелкозернистого ГЦПВ-бетона с добавками АД

Из рис. 5 видно, что максимальная подвижность достигается при средних концентрациях АД, точка экстремума у состава с АД1 при 0,006 %, а у АД2 и АД3 – при 0,0 9%. При увеличении дозировок подвижность резко снижается

до значений контрольного бездобавочного состава.

Влияние АД на плотность в марочном возрасте показано на рис. 6.

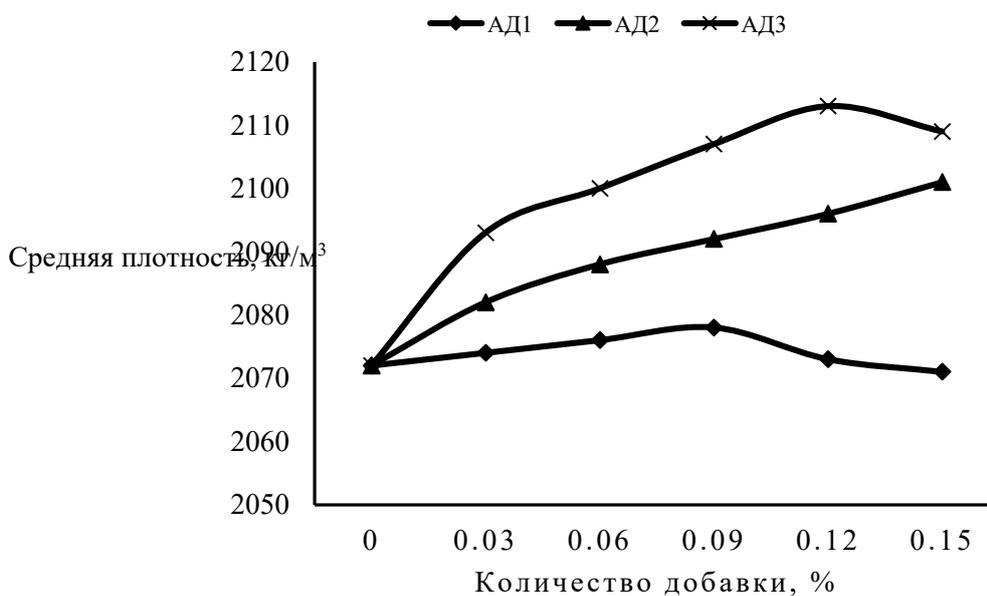


Рис. 6. Плотность мелкозернистого ГЦПВ-бетона с добавками АД

По влиянию АД на плотность бетона расположились в ряду по возрастанию: АД1, АД2 и АД3 (тах увеличение плотности на 4% при дозировке 0,15 %).

Прочностные характеристики представлены на рис.7, рис. 8 и коэффициент размягчения на рис. 9.

Анализ рис. 7, 8 и 9 показал одинаковый характер влияния АД на прочность при изгибе и сжатии и на коэффициент размягчения.

АД1 (на основе минерального масла) оказывает негативное влияние на прочностные характеристики и на коэффициент размягчения.

Максимальные прочностные характеристики получены при введении АД3, что согласуется с данными по плотности. При этом следует отметить, что при больших дозировках – АД2 и АД3 (0,15 %) происходит спад прочности.

Максимальный прирост прочности при изгибе при дозировке 0,12 % для АД2 и АД3 составляет 19 и 34 %, соответственно.

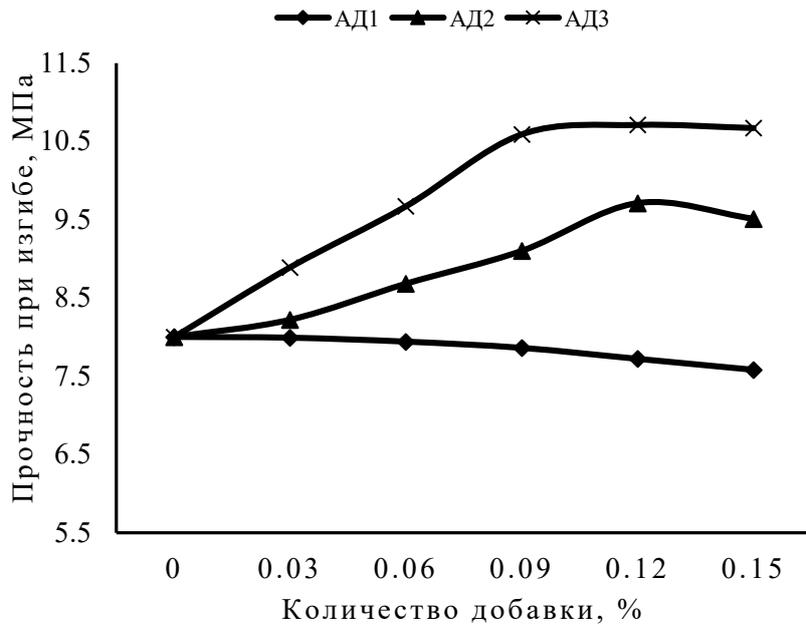


Рис. 7. Прочность при изгибе мелкозернистого ГЦПВ-бетона с добавками АД

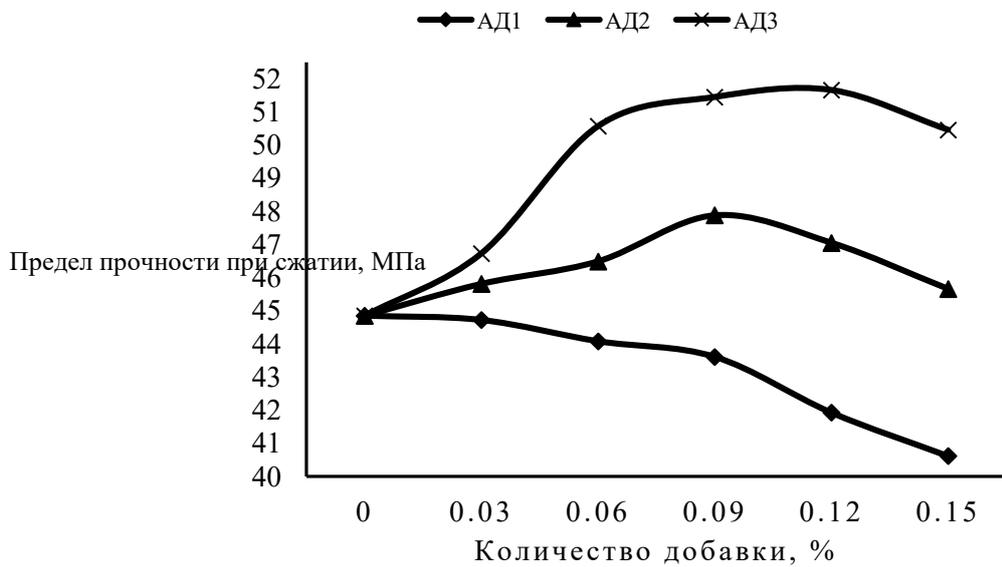


Рис.8. Прочность на сжатие мелкозернистого ГЦПВ-бетона с добавками АД

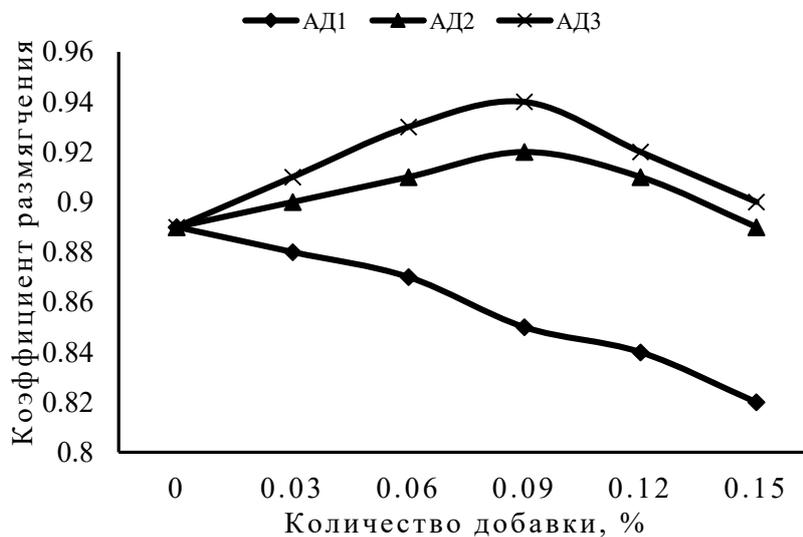


Рис. 9. Коэффициент размягчения мелкозернистого ГЦПВ-бетона с АД добавками

Максимальный прирост прочности при сжатии при дозировке 0,12% для АД2 и АД3 составляет 7 % и 15,2 %, соответственно.

При дозировке 0,09 % АД2 и АД3 наблюдается максимальное значение коэффициента размягчения 0,92 и 0,94, соответственно.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что введение в состав ГЦПВ-смеси активизирующей добавки на основе силикона, модифицированного полиэфиром, позволяет получить наилучшие технологические и эксплуатационные характеристики, а именно: повысить подвижность на 13,5 %, плотность – на 2 %, прочность при сжатии - на 15 %, при изгибе - на 34 % и коэффициент размягчения – на 6 %.

Рост характеристик ГЦПВ-бетона с АД добавками связываем с дисперсностью пор. Для установления характеристик пор бетона использована математическая программа «NI Vision Assistant LabVIEW», алгоритм которой позволяет обрабатывать исследуемые участки, считывая геометрию пор и производя их графикацию по размерам. Результаты представленных в табл. 8 и на рис. 10.

Рост характеристик ГЦПВ-бетона с АД добавками связываем с дисперсностью пор. Для установления характеристик пор бетона использована математическая программа «NI Vision Assistant LabVIEW», алгоритм которой позволяет обрабатывать исследуемые участки, считывая геометрию пор и производя их графикацию по размерам. Результаты представленных в табл. 8 и на рис. 10.

Таблица 8

Характеристики пор ГЦПВ-бетона при введении различных АД

Шифр	Площадь обработанного изображения, мм ²	Количество пор в обработанных изображениях	Средняя площадь пор, (мм ²)	Средний диаметр пор, мм	Отношение пустот к площади поперечного сечения
Конт.	1631	59	0,37	0,69	1,34
АД1	1629	101	0,22	0,53	1,36
АД2	1638	57	0,075	0,31	0,26
АД3	1635	16	0,05	0,25	0,05

Как видно из табл. 8 и рис. 10, наибольшее количество пор (101 шт) имеет ГЦПВ-бетон с АД1 (рис. 10б) и средний размер пор – 0,53 мкм. При этом, полученные значения среднего диаметра пор на 30 % меньше контрольного без АД (рис. 10а). Минимальное влияние АД1 можно объяснить его механизмом действия – АД1 медленного действия и она не подходит для быстротвердеющих систем.

Для смесей ГЦПВ-бетона с АД2 (рис. 10в), количество пор составляет 57 шт, а средней размер пор – 0,31 мкм и эти значения на 122,5 % меньше контрольного состава.

Наименьшее количество пор (16 шт) наблюдается у состава ГЦПВ-бетона с АД3 (рис. 10г) на основе силикона, модифицированного полиэфиром – средний размер пор 0,25 мкм, что на 176 % меньше по сравнению с контрольным.

Таким образом, установлена прямая зависимость влияния количества и размер пор на прочностные характеристики ГЦПВ бетона.

Выводы

1. Максимальный эффект действия активизирующих добавок получен при их максимальных дозировках. Активизирующая добавка на основе силикона, модифицированного полиэфиром, позволяет снизить воздухопроницаемость ГЦПВ-смеси в два раза по сравнению с контрольным составом.

2. Рекомендуемая дозировка добавки на основе силикона, модифицированного полиэфиром и добавки на основе жирных спиртов, составляет 0,06–0,09 % от массы ГЦПВ-бетона.

3. При выборе активизирующих добавок необходимо учитывать их механизм действия. Установлено, что активизирующая добавка на основе минерального масла, относящаяся по механизму действия к категории «медленные» не подходит для ГЦПВ композиций.

4. Применение в состав ГЦПВ-смеси активизирующей добавки на основе силикона, модифицированного полиэфиром, улучшает их технологические и эксплуатационные характеристики, а именно: подвижность увеличилась на 13,5 %, повысилась плотность на 2 %, прочность при сжатии – на 15 %, при изгибе – на 34 % и коэффициент размягчения на 6 % по сравнению с контрольным составом.

5. Показано, что активизирующие добавки изменяют поровую структуру ГЦПВ-бетона. Так, активизирующие добавки на основе силикона, модифицированного полиэфиром и добавки на основе жирных спиртов, уменьшают общее количество пор и их размер, повышают физико-механические свойства бетона. Тогда как активизирующие добавки на основе минерального масла увеличивают общее количество пор в ГЦПВ-бетоне и приводят к снижению его физико-механических показателей.

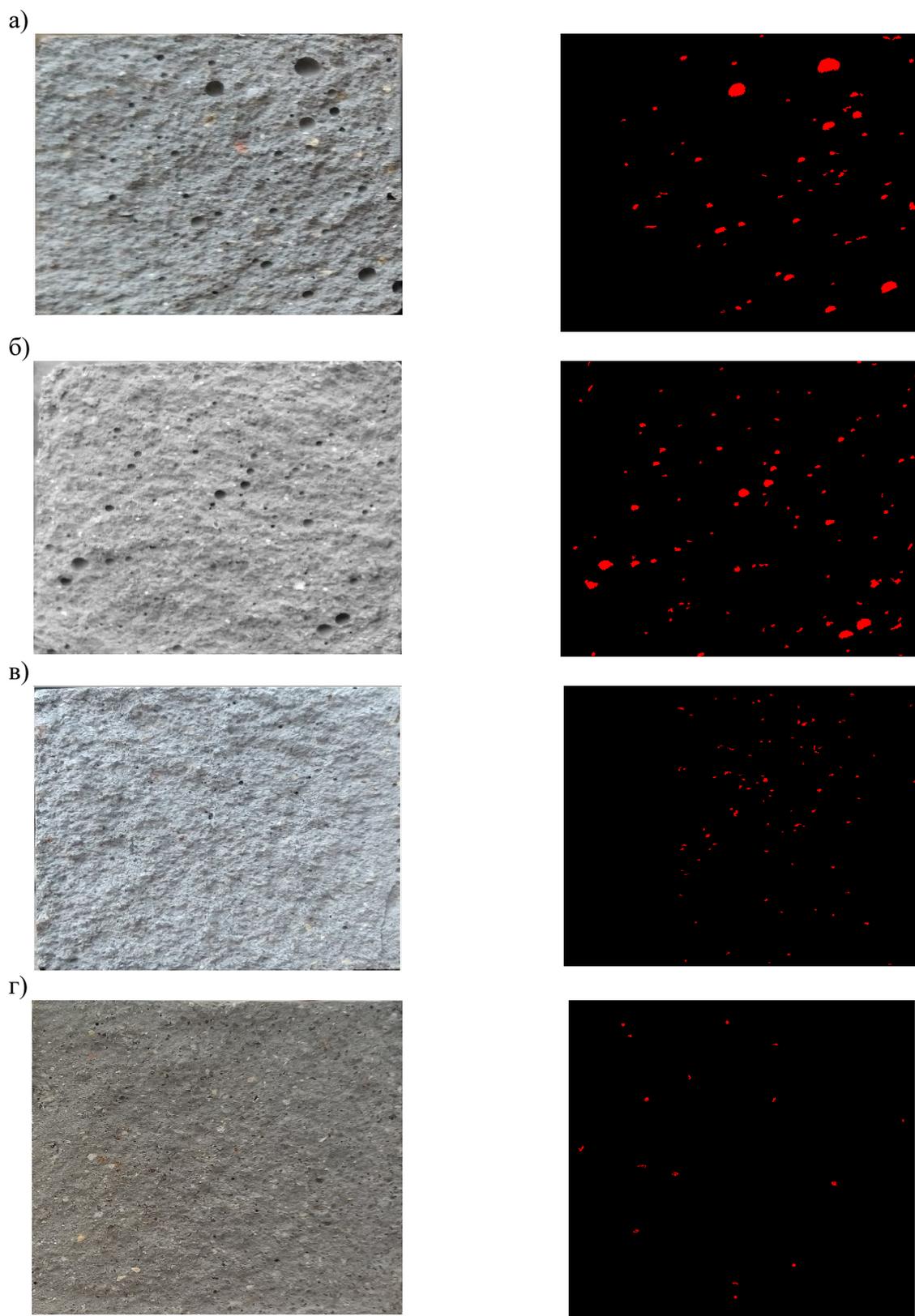


Рис. 10. Макроструктура ГЦПВ бетона: а – без АД; б – с АД1; в – с АД2; г – с АД3

Благодарность. Автор выражает благодарность руководству университета Саны, факультет гражданского строительства за возможность проведения исследования в лаборатории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добшиц Л.М. Физико-математическое моделирование морозостойкости цементных бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 313–321. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-313-321

2. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 63–68.
3. Perevoshchikova A.N., Valtisfer I.V., Kondrashova N.B., Voronina N.S. The physical and mechanical properties of concrete with multifunctional additive. *Nanotechnologies in construction*. 2024; 16(2). Pp. 170–179. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179. EDN: BFTEZA.
4. Морозова Н.Н., Закиров К.И. Сравнительная эффективность замедлителей схватывания гипсоцементнопуццоланового бетона для 3D-печати // *Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве*. ВладСтройТех 2024: материалы I международной конференции молодых ученых / под общ. ред. Ю.Т. Панова и С.В. Ананьева. М: ИП Лысенко А.Д. «Press-Book.ru», 2024. С. 131–134
5. Пуценко К.Н., Балабанов В.Б. Перспективы развития и применения сухих строительных смесей на основе гипса // *Вестник иркутского государственного технического университета*. 2015. №7 (102). С. 148–154.
6. Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Исследование влияния активных минеральных добавок на реологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Строительные материалы*. 2015. №5. С. 20–24.
7. Чернышева Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья. Автореферат дис. доктора техн. наук. Белгород. 2014. 36 с.
8. Аунг Чжо Ньейн, Потапова Е.Н. влияние вида пуццолановой добавки на состав и свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2022. С. 7–9.
9. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. №8. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024- 9-8-20-28.
10. Хамза Абдулмалек Кайс, Морозова Н.Н. Влияние пластифицирующих добавок различного состава на свойства комплексного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 8–24. С. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70
11. Халиуллин М.И., Нуриев М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Влияние пластифицирующих добавок на свойства гипсоцементнопуццоланового вяжущего // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 6. С. 119–122.
12. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Влияние пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 382–387.
13. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Повышение водостойкости гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного гипса // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 333–343.
14. Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Низамов Р.К. Гипсоцементно-пуццолановый бетон с гидрофобизирующими добавками // *Известия КГАСУ*. 2024. № 4(70). С. 19–32. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.2, EDN: VZCPBD
15. Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Хохряков О.В. Сравнительная эффективность добавок гидрофобизирующего и кристаллизационного действия на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и бетона на его основе // *Строительные материалы*. 2024. № 11. С. 63–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72.
16. Xue F., Meng P., Zhang J. Bao J., Wang K. Influence of water re-curing on microstructure of heat-damaged cement mortar characterized by low-field NMR and MIP // *Construction and Building Materials*. 2020, Vol. 262. 120532. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120532.
17. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А., Петрова Т.М. Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 67–71. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71.
18. Song G., Hong S. Effect of dispersibility of carbon nanotubes by silica fume on material properties of cement mortars: hydration, pore structure, mechanical properties, self-desiccation, and autogenous shrinkage // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 265. 120318. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120318.
19. Liu H., Wei D., Zou A. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 249. 119333. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119333.
20. Bilal H., Chen T., Ren M., Gao X., Su A. Influence of silica fume, metakaolin and SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete // *Construction and Building Materials*. 2021, Vol. 275. 122124. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.122124.
21. Das S., Weerasiri L. D., Yang W. Influence of surface tension on bubble nucleation, formation and onset of sliding // *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*. 2017. Vol. 516. 23.
22. Wang S.X., Zhang G.F., Wang Z.J., Huang T.Y., Wang P.M. Effect of defoaming agent on the

properties of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose through adjusting air content gradient // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 139 (2-3). 105024. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105024.

23. La'zniewska-Piekarczyk B. Influence of anti-foaming admixture on frost resistance and porosity characteristic of self-compacting concrete // Archives of Civil Engineering. 2011. Vol. 4. Pp. 389–399.

24. Radlinski M., Olek J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods. Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (FT) Durability: ASTM International; 2010.

25. Choi K., Min Y.K., Chung W., Lee S.-E., Kang S.-W. Effects of dispersants and defoamers on the enhanced electrical performance by carbon nano-

tube networks embedded in cement-matrix composites // Composite Structures. 2020, Vol. 243. 112193. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112193.

26. Puthipad N., Ouchi M., Rath S., Attachaiyawuth A. Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 144. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.049

27. Morozova N., Kais K., Gilfanov R. Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2434. 020009. DOI: 10.1063/5.0091723

28. Фролкин О.А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: автореф. дис...канд. техн. наук. Саранск. 2000. 18 с.

Информация об авторах

Кайс Хамза Абдулмалек, преподаватель-исследователь. E-mail: hamza.qais@mail.ru. Университет Саны (13064, г. Сана, Республика Йемен).

Поступила 10.02.2025 г.

© Кайс Х.А., 2025

Qais H.A.

University of Sana'a

E-mail: hamza.qais@mail.ru

INFLUENCE OF ANTIFOAMING ADDITIVES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE BASED ON A GYPSUM-CEMENT-POZZOLAN BINDER

Abstract. It is known that the introduction of air-entraining additives (SAA) improves both the technological properties of the concrete mix - workability, and increases the operational characteristics of concrete - frost resistance. At the same time, it is also possible to improve the operational characteristics by controlling the nature of the pore structure of concrete.

One of the known methods for controlling the pore structure is the use of antifoaming additives. The paper shows the effect of antifoams in concretes based on gypsum-cement – pozzolanic binder (GCPB). The choice of concrete for the study based on gypsum-cement – pozzolanic binder is due to the development of additive technologies.

The effect of three types of antifoaming additives on the properties of concrete mix from gypsum-cement-pozzolanic binder was studied: mobility, air entrainment and density, as well as the properties of gypsum-cement concrete - this is strength and its softening coefficient. To determine the pore structure, a method based on the analysis of images of the pore structure of gypsum-cement concrete was used. A direct dependence of the influence of the size and number of pores on the strength characteristics of concrete with antifoaming additives has been established. An optimal composition of the GCPB mixture with an antifoaming additive based on polyester-modified silicone has been obtained, which allows increasing: mobility by 13.5 %, density by 2 %, compressive strength by 15% and bending strength by 34 % relative to the control composition.

Keywords: gypsum cement-pozzolanic binder, antifoaming additives, mineral oils, fatty alcohol, silicone modified with polyester, mobility, air entrainment, density, strength, softening coefficient.

REFERENCES

1. Dobshits L.M. Physical and mathematical modeling of frost resistance of cement concrete [Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye morozostoykosti tsementnykh betonov]. Structural mechanics of engineering structures and constructions.

2023. Vol. 19. No. 3. Pp. 313–321. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-313-321. (rus)

2. Qais H.A., Morozova N.N. Properties of natural zeolite for obtaining high-strength fine-grained concrete [Svoystva prirodnogo tseolita dlya

polucheniya vysokoprochnogo melkozernistogo betona]. Construction materials. 2017. No. 6. Pp. 63–68. (rus)

3. Perevoshchikova A.N., Valtsifer I.V., Kondrashova N.B., Voronina N.S. The physical and mechanical properties of concrete with multifunctional additive. Nanotechnologies in construction. 2024. Vol. 16. No. 2. Pp. 170–179. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179. EDN: BFTEZA.

4. Morozova N.N., Zakirov K.I. Comparative efficiency of gypsum-cement-pozzolanic concrete setting retarders for 3D printing [Sravnitel'naya effektivnost' zamedliteley skhvatyvaniya gipsotsementnopotstsolanovogo betona dlya 3D – pechati]. Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. VladStroyTech 2024: Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists. edited by Yu.T. Panov and S.V. Ananyev. M: IP Lysenko A.D. "Press-Book.ru", 2024. Pp. 131–134. (rus)

5. Putsenko K.N., Balabanov V.B. Prospects for the Development and Application of Dry Building Mixes Based on Gypsum [Perspektivy razvitiya i primeneniya sukhikh stroitel'nykh smesey na osnove gipsa]. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2015. No. 7 (102). Pp. 148–154. (rus)

6. Izotov V.S., Mukhametrakhimov R.Kh. Galatdydinov A.R. Study of the influence of active mineral additives on the rheological and physical-mechanical properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Issledovaniye vliyaniya aktivnykh mineral'nykh dobavok na reologicheskiye i fiziko-mekhanicheskiye svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego] Construction Materials. 2015. Vol. 5. Pp. 20–24. (rus)

7. Chernysheva N.V. Waterproof gypsum composite materials using technogenic raw materials [Vodostoykiye gipsovyeye kompozitsionnyye materialy s primeneniye tekhnogennogo syr'ya]. Diss. Cand. of Technical Sciences. Belgorod. 2014. 434 p. (rus)

8. Aung Kyaw Nyein, Potapova E.N. Influence of the type of pozzolanic additive on the composition and properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Vliyaniye vida putstsolanovoy dobavki na sostav i svoystva gipsotsementnopotstsolanovogo vyazhushchego]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2022. Pp. 7–9. (rus)

9. Qais H.A., Bogdanov R.R., Morozova N.N., Mavlyuberdinov A.R., Suleymanova L.A. Influence of superplastifying additives based on polycarboxylate ether on the properties of gypsocement-pozzolanic binder [Vliyaniye superplastifitsiruyushchikh dobavok na osnove efira polikarboksilata na svoystva gipsotsementnopotstsolanovogo

vyazhushchego]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024]. No. 8. Pp. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28. (rus)

10. Hamza Abdulmalek Qais, Morozova N.N. Influence of plastifying additives of different origin on the properties of complex gypsum-cement-pozzolanic binder [Vliyaniye plastifitsirushchikh dobavok razlichnogo sostava na svoystva kompleksnogo gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego]. Izvestiya of Higher Education Institution. Construction. 2024. No. 8–24. Pp. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70. (rus)

11. Khaliullin M.I., Nuriev M.I., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R. The influence of plasticizing additives on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Vliyaniye plastifitsiruyushchikh dobavok na svoystva gipsotsementnopotstsolanovogo vyazhushchego]. Bulletin of Kazan Technological University. 2015. No. 18 (6). Pp. 119–122. (rus)

12. Mukhametrahimov R.Kh., Galautdinov A.R. Influence of plasticizing additives on the main properties of gypsum-cement-pozzolanic binder based on low-grade and technogenic raw materials [Vliyaniya plastifitsiruyushchikh dobavok na osnovnyye svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego na osnove nizkomarochnogo i tekhnogennogo syr'ya]. News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2016. No. 4 (38). Pp. 382–387. (rus)

13. Galautdinov A.R., Mukhametrahimov R. Kh. Increasing the water resistance of gypsum-cement-pozzolanic binder based on low-grade gypsum [Povysheniye vodostoykosti gipsotsementnopotstsolanovogo vyazhushchego na osnove nizkomarochnogo gipsa]. News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2016. No. 4 (38). Pp. 333–343. (rus)

14. Qais H.A., Morozova N.N., Nizamov R.K. Gypsum-cement-pozzolan concrete with hydrophobic additives [Gipsotsementno-putstsolanovyy beton s gidrofobiziruyushchimi dobavkami]. News of KSUAE. 2024. No. 4(70). Pp. 19–32. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.2 EDN: BZCPBD. (rus)

15. Qais H.A., Morozova N.N., Khokhryakov O.V. Comparative efficiency of additives with hydrophobizing and crystallization action on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder and concrete based on it [Sravnitel'naya effektivnost' dobavok gidrofobiziruyushchego i kristallizatsionnogo deystviya na svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego i betona na yego osnove]. Construction materials. 2024. No. 11. Pp. 63–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72.

16. Xue F., Meng P., Zhang J., Bao J., Wang K. Influence of water re-curing on microstructure of heat-damaged cement mortar characterized by low-

field NMR and MIP. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. 120532. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120532.

17. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A., Petrova T.M. Microporosity of cellular concrete and its influence on thermal conductivity [Mikroporistost' yacheistogo betona i yeye vliyaniye na teploprovodnost']. *Construction materials*. 2021. No. 8. Pp. 67–71. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71. (rus)

18. Song G., Hong S. Effect of dispersibility of carbon nanotubes by silica fume on material properties of cement mortars: hydration, pore structure, mechanical properties, self-desiccation, and autogenous shrinkage. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 265. 120318. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120318.

19. Liu H., Wei D., Zou A. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 249. 119333. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119333.

20. Bilal H., Chen T., Ren M., Gao X., Su A. Influence of silica fume, metakaolin and SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 275. 122124. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.122124.

21. Das S., Weerasiri L. D., Yang W. Influence of surface tension on bubble nucleation, formation and onset of sliding. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*. 2017. Vol. 516. P. 23.

22. Wang S.X., Zhang G.F., Wang Z.J., Huang T.Y., Wang P.M. Effect of defoaming agent on the properties of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose through adjusting air content gradient. *Cement and Concrete Composites*. 2023.

Vol. 139 (2-3). 105024. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2023.105024.

23. La'zniewska-Piekarczyk B. Influence of anti-foaming admixture on frost resistance and porosity characteristic of self-compacting concrete. *Archives of Civil Engineering*. 2011. Vol. 4. Pp. 389–399.

24. Radlinski M., Olek J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods. *Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (FT) Durability: ASTM International*; 2010.

25. Choi K., Min Y.K., Chung W., Lee S.-E., Kang S.-W. Effects of dispersants and defoamers on the enhanced electrical performance by carbon nanotube networks embedded in cement-matrix composites. *Compos. Struct*. 2020. Vol. 243. 112193. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112193.

26. Puthipad N., Ouchi M., Rath S., Attachaiyawuth A. Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content. *Construct. Build. Mater*. 2017, Vol. 144. Pp. 1–12.

27. Morozova N., Kais K., Gilfanov R. Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2434. 020009. DOI: 10.1063/5.0091723

28. Frolkin, O.A. Computer modeling and analysis of the structure of composite materials: author's abstract [Komp'yuternoye modelirovaniye i analiz struktury kompozitsionnykh materialov]. diss... candidate of technical sciences. Saransk. 2000. 18 p. (rus)

Information about the author

Qais Hamza Abdulmalek. Teacher-researcher of the Faculty of Engineering. E-mail:hamza.qais@mail.ru. University of Sana'a, Republic of Yemen, 13064, Sana'a.

Received 10.02.2025

Для цитирования:

Кайс Х.А. Влияние антивспенивающих добавок на структуру и свойства модифицированного бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 20–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-20-32

For citation:

Qais H.A. Influence of antifoaming additives on the structure and properties of modified concrete based on a gypsum-cement-pozzolan binder. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No.7. Pp. 20–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-20-32

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43

^{1,*}Шилов С.С., ²Уртенков А.И., ¹Молева А.А.¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет²Компания ТехноНИКОЛЬ

*E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКИХ КРЫШ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. С развитием новых материалов и технологий возникает необходимость создавать новые или модернизировать существующие кровельные системы. Взаимодействие кровельных систем с ветровыми потоками является важным аспектом проектирования, так как повышенная ветровая нагрузка может оказывать значительное давление на крышу и вызывать ее повреждение или даже разрушение в целом или отдельных элементов. Рассмотрены решения крыши ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ без фиксации сборной стяжки в несущее основание и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки теплоизоляционных и клиновидных плит XPS на клей-пену. Исследование применялось с использованием численного моделирования ветровых потоков в программно-вычислительном комплексе Ansys CFX. В результате итерационного расчета получены данные о распределении ветрового давления по поверхности исследуемых моделей здания, вычислены значения ветровой нагрузки, способствующие подъему кровельных слоев из-за возникновения отрицательного давления, определены предельные высоты зданий и ветровые районы, для которых принятые решения покрытий допустимы. Выявлена максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкций ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ в условиях размещения здания на площадке, относящейся к типу местности В. Установлена допустимая высота здания в различных ветровых районах при применении кровельных решений ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ с возможностью допустимого подъема сборной стяжки из хризотилцементных листов и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену. Результаты исследований могут быть применены на практике при проектировании зданий и сооружений, имеющих схожие с исследуемой моделью геометрические параметры.

Ключевые слова: кровельные системы, вычислительная гидрогазодинамика, граничные условия, ветровые потоки, CFD-моделирование, аэродинамика зданий.

Введение. С развитием строительного производства, появлением новых материалов и технологий, усовершенствованием расчетных комплексов увеличивается вариативность решений по устройству кровельных систем плоских крыш зданий. На российском рынке одним из лидеров по производству кровельных, гидроизоляционных и теплоизоляционных материалов является компания ТехноНИКОЛЬ. Решения систем плоской кровли компании имеют различные вариации в зависимости от типа здания, степени эксплуатации крыши, ее несущего основания, материала теплоизоляционного слоя (каменная вата, пенополиизоцианурат, экструзионный пенополистирол), требуемого предела огнестойкости и метода укладки кровельных материалов (клеевой метод, механическое крепление, сплошная или частичная приклейка, свободная укладка). Все они должны соответствовать требованиям по пожарной безопасности, долговечности, экономичности, обеспечивать тепло- и гидроизоляцию и быть безопасными в эксплуатации, из-за чего проектирование таких объектов сопровождается решением сложных инженерных задач, одна из которых – прогнозирование взаимодействия покрытия зда-

ния с воздушными потоками. Данная проблематика на протяжении долгих лет изучается как отечественными, так и иностранными специалистами [1–10].

Объект исследования представляет собой прямоугольное в плане здание размерами 56,0×16,0 м высотой до 75,0 м, которое имеет плоскую крышу с уклоном 2,1 % и парапет высотой до 2,0 м. В данном исследовании было условно принято ограничение по высоте в 75 м, которое связано с рекомендациями свода правил СП17.13330.2017 «Кровли», а именно: «На крышах высотных зданий (более 75 м) из-за повышенного воздействия ветровой нагрузки рекомендуется сплошная приклейка водоизоляционного ковра к основанию из плотных малопористых материалов (цементно-песчаной или асфальтовой стяжки и т. п.), теплоизоляционных плит к пароизоляции, а пароизоляционного слоя к несущей конструкции».

Целью исследования являлась проверка возможности применения ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без фиксации (приклейки) теплоизоляционных и клиновидных плит XPS на клей пену и определение

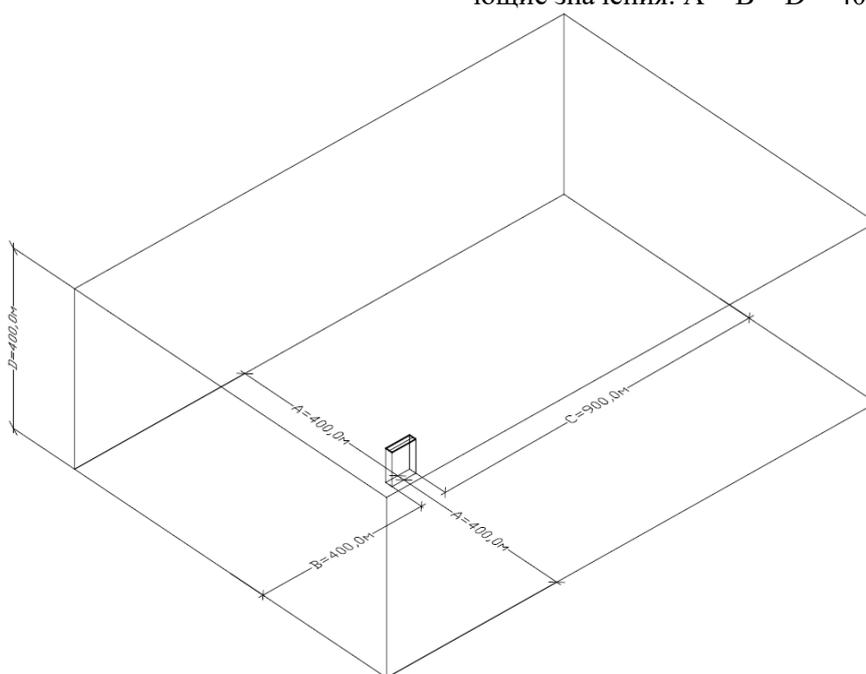
ветровых районов, в которых возможно применять такие решения. Серия вычислительных экспериментов проводилась для типов местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м) в соответствии с п. 11.1.6 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Вся информация и характеристики исследуемых кровель приняты из альбомов технических решений компании ТехноНИКОЛЬ.

Основные задачи исследования – расчет ветровой нагрузки, способствующей подъему кровельных слоев из-за возникновения отрицательного давления, определение предельной высоты здания, на которой собственный вес материалов крыши будет препятствовать этому подъему, и ветровых районов, для которых принятые решения покрытия допустимы. Практическая значимость исследований заключается в возможности использования результатов при проектировании зданий и сооружений, имеющих схожие геометрические параметры.

Методы, оборудование, материалы. В настоящее время существуют целый ряд про-

граммно-вычислительных комплексов, в которых реализованы процессоры по решению основных уравнений гидрогазодинамики [11], описывающих движения жидких и газообразных сред. Численное моделирование выполнено с использованием рабочей среды программного обеспечения Ansys Workbench и модуля вычислительной гидрогазодинамики Ansys CFX (лицензия Ansys CostumerNumber: 1051709). Данная программа рекомендована как одна из основных и наиболее применяемых в отечественной и зарубежной практике [12, 13].

Построена твердотельная модель объекта, вовлеченного в расчётную область с целью дальнейшего импорта в SpaceClaim рабочей среды Ansys Workbench. Модель представляет собой твердотельный объем Solid, моделирующий воздушное пространство вокруг исследуемого объекта. Данному объему присваиваются свойства воздушной среды. Размеры расчётного пространства были приняты в соответствии с [12] в зависимости от максимального размера объекта: $A \geq 5H_{max}$, $B \geq 5H_{max}$, $C \geq 10 H_{max}$, $D \geq 5H_{max}$ (рис. 1). В данном исследовании были приняты следующие значения: $A = B = D = 400,0$ м, $C = 900,0$ м.



ис. 1. Размеры расчётной области

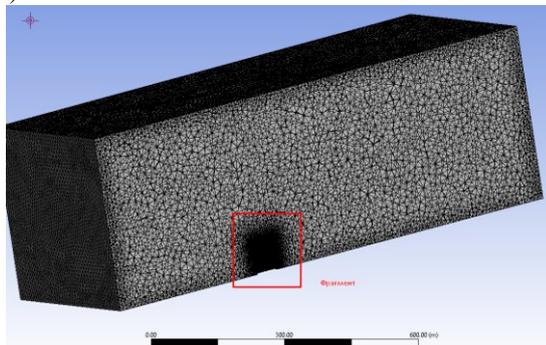
После создания расчетной области производится формирование расчетной сетки (рис. 2) в препроцессоре *Ansys Meshing*. Так как вблизи здания воздушные потоки терпят сильное изменение, необходимо производить сгущение сетки вблизи здания для более точного решения уравнений гидрогазодинамики и корректности решений в целом. С этой целью в пограничном слое сетки применялся метод *Inflation*, который разделяет пространство вокруг исследуемого объекта.

Выбрана модель турбулентности *SST (Shear Stress Transport)*, как наиболее подходящая для решения задач аэродинамики здания по различным рекомендациям [14].

В качестве характеристик набегающего потока на «входе» (*Inlet*) используется профиль скорости, определяемый на основании действующих нормативных документов по формуле «2» нормативного документа «ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых

нагрузок на ограждающие здания». Также на входе необходимо задать значения интенсивности турбулентности и масштаба длины вихрей. Расчет проводился по своду правил «EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: action on structure», где

а) б)



интенсивность турбулентности определяется по формуле 4.7, а масштаб длины вихрей определяется по формуле В.1 данного нормативного документа.

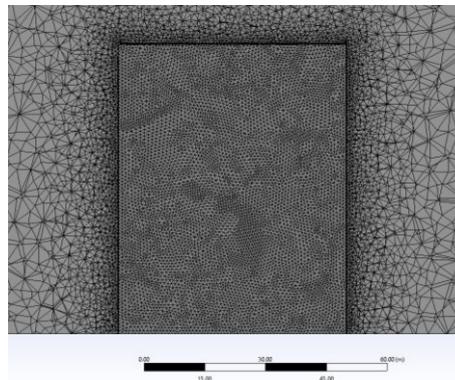


Рис. 2. Расчетная сетка, сформированная в *Ansys Meshing* (а – общая модель, б – фрагмент пространства в районе исследуемого здания)

Расчет производился в рабочей среде *Ansys CFX-Solver Manager*, в качестве необходимых значений, которые должны быть достигнуты, были заданы среднеквадратичные невязки $RMS=10^{-4}$. При достижении требуемой сходимости решений уравнений возможность производится анализ полученных результатов.

На «выходе» (*Outlet*) задается нормальное атмосферное давление (избыточное давление равно нулю) и такие же параметры турбулентности, как и на «входе».

На верхней и боковых (для расчетной области в форме параллелепипеда) границах расчетной области используются условия симметрии потока. На нижней границе расчетной области и на всех поверхностях зданий и сооружений используется условие «стенки с прилипанием», исключающее проникновение вещества через поверхность.

В результате итерационного расчета были получены данные о распределении ветрового давления по поверхности исследуемых моделей здания для типа местности В.

Основная часть. Первая серия вычислительных экспериментов проведена для ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ.

Исходя из данных таблиц технических решений компании ТехноНИКОЛЬ, определяем нагрузку от собственного веса водоизоляционного ковра и основания, с которой в дальнейшем будем производить сравнение. Результаты сводим в таблицу 1.

Возможными аварийными ситуациями будут являться:

- Отслоение Техноэласт ЭКП – адгезия составляет 0,1 МПа или 100,0 кПа;

- Отслоение Унифлекс ВЕНТ П – адгезия составляет 0,05 МПа или 50,0 кПа;

- Начало подъема сборной стяжки и достижение такого момента, когда один из краев выйдет из-под парапета, что считается недопустимым.

Максимальная величина подъема, при которой стяжка выйдет из-под конструкции парапета определяется геометрически (рис. 3).

Таблица 1

Вес кровли ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	3,0	4
3	Сборная стяжка из хризотилцементных прессованных плоских листов	20,0	36,0
	ВСЕГО:.		45,3

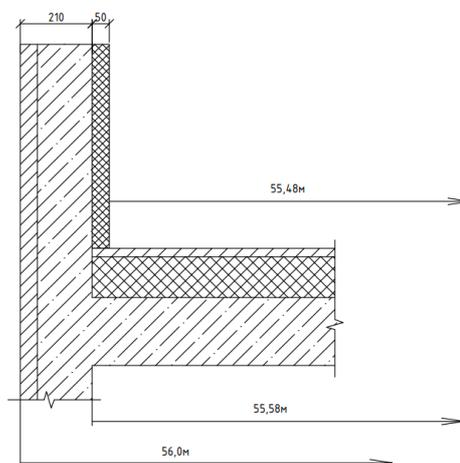


Рис. 3. К определению величины подъема (прим.: конструкции кровли условно не показаны)

Кровля представляет собой пластину размерами в осях 55,48x15,58 метров, свободно опертую по 4 сторонам. Прогиб пластины от равномерно распределенной нагрузки определяется по формуле:

$$w = k_1 \frac{qa^4}{Et^3}, \quad (1)$$

где: $b/a = 55,58/15,58 = 3,57$ – отношение сторон пластины;

$k_1 = 0,137$ м – коэффициент, зависящий от отношения сторон и принимаемый по табл. III.1 [15];

$q = q_{вет} - 45,3$ – нагрузка от ветрового воздействия за исключением собственного веса кровли [10];

E – модуль упругости листового асбестоцемента;

t – толщина пластины.

Выразив из формулы значение q , получаем расчетное значение 1,35 кПа. Данное значение соответствует подъему кровли до такого состояния, когда один край сборной стяжки из хризотилцементных листов выйдет из-под парапета.

Проводились расчеты для каждого ветрового района и таким образом находились такие значения ветрового давления, при котором будет невозможно использовать исследуемое покрытие. Далее продемонстрированы значения на границе ветровых районов. Для типа местности В получены значения ветрового давления на покрытие в результате численного моделирования (рис. 4).

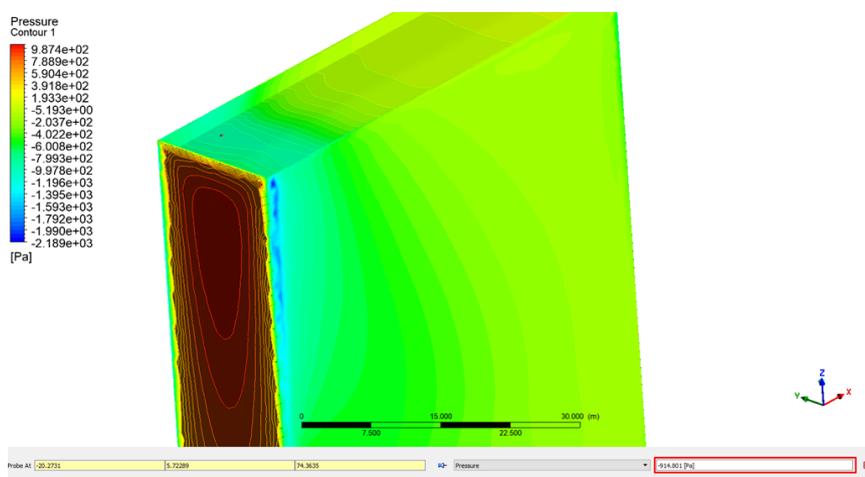


Рис. 4. Значения ветрового давления на покрытие (VI ветровой район)

На основании данных, полученных из рисунка 4, определяем максимальное давление на покрытие здания для VI ветрового района. Данное значение составляет около -915,0 Па. Тогда с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки 1,4 значение составит 1,28 кПа, что меньше допускаемого 1,35 кПа.

Таким образом имеем, что нагрузка от ветрового воздействия не превышает прочности адгезии битумно-полимерных слоев кровли, а также не достигает нагрузки, при которой будет возникать предельное значение прогиба пластины. Повысив значения скорости до VII ветрового района, проводим повторный расчет с обновленными входными данными (рис. 5).

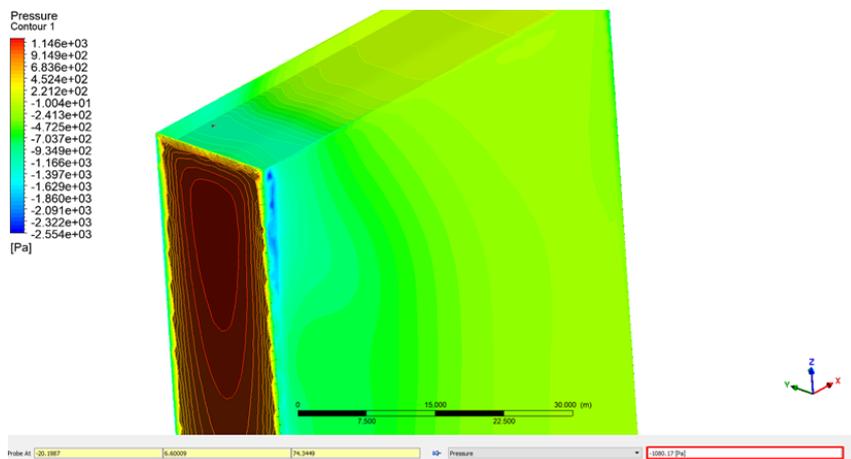


Рис. 5. Значения ветрового давления на покрытие (VII ветровой район)

Максимальное значение составляет около - 1,08 кПа. Тогда с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки 1,4 значение составит 1,51 кПа, что больше допускаемого 1,35 кПа. Таким образом имеем, что нагрузка от ветрового воздействия превосходит действующий вес покрытия с возможностью допустимого отрыва, что приводит к выходу сборной стяжки из хризотилцементных листов из-под конструкции парапета.

Отсюда следует, что для зданий высотой до 75,0 метров можно применять решение ТН-

КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ, если строение располагается в VI ветровом районе при типе местности В. Можно определить скорость ветра на данной отметке и найти высоту, на которой данная скорость достигается в других ветровых районах, так как ветровое давление зависит от скорости ветровых потоков.

Вычислим по ранее приведенным формулам значение скорости в зависимости от ветрового района (таблица 2).

Таблица 2

Значения скорости ветра для ветровых районов

Ветровой район	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
U ₀ , м/с	16,83	19,58	22,36	25,17	28,28	31,62	34,88	37,64
z, м	U(z)							
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	13,47	15,66	17,89	20,14	22,63	25,30	27,91	30,11
20	15,47	17,99	20,55	23,13	26,00	29,06	32,06	34,59
30	16,78	19,51	22,29	25,08	28,19	31,52	34,77	37,51
40	17,77	20,67	23,61	26,57	29,86	33,39	36,82	39,74
50	18,58	21,61	24,68	27,78	31,22	34,91	38,51	41,55
60	19,27	22,42	25,60	28,81	32,38	36,21	39,94	43,09
70	19,88	23,12	26,40	29,72	33,40	37,34	41,19	44,44
75	20,15	23,44	26,77	30,13	33,86	37,86	41,76	45,06

Как видно из таблицы 2, для VI ветрового района на высоте 75,0 метров скорость ветровых потоков составляет 41,76 м/с, данная скорость для VII района составляет около 50,0 метров.

Вторая серия вычислительных экспериментов проведена для ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену. Выделена расчётная полоса шириной 1,0 м, на которой имеются наибольшие давления, затем такая полоса рассчитана как двухшарнирная балка с приложенными на нее нагрузками. Исходя из данных таблицы 2, определяем действующую нагрузку от собственного веса состава покрытия, с которой в дальнейшем будем производить сравнение. Результаты сводим в таблицу 3.

Таблица 3

Вес покрытия ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	3,0	4
3	Сэндвич ТЕХНОНИКОЛЬ Ц-XPS	60	21,9
	ВСЕГО:		31,2

Возможными аварийными ситуациями будут являться:

- отслоение Техноэласт ЭКП – адгезия составляет 0,1 МПа или 100,0 кПа;
- отслоение Унифлекс ВЕНТ П – адгезия составляет 0,05 МПа или 50,0 кПа;
- Превышение предела прочности при изгибе плит Ц-XPS.

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенного в III ветровом районе представлены на рисунке 6.

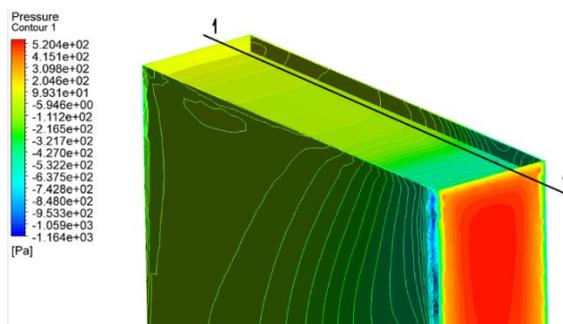


Рис. 6. Значения ветрового давления на покрытие (III ветровой район)

Как говорилось ранее, в качестве расчетной схемы принимается двухшарнирная балка шириной 1,0 м. Схема приложения нагрузка приведена на рисунке 7.



Рис. 7. Схема приложения нагрузки на балку: верх – нагрузка от собственного веса кровли, низ – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загружений, строится эпюра изгибающих моментов (рис. 8).

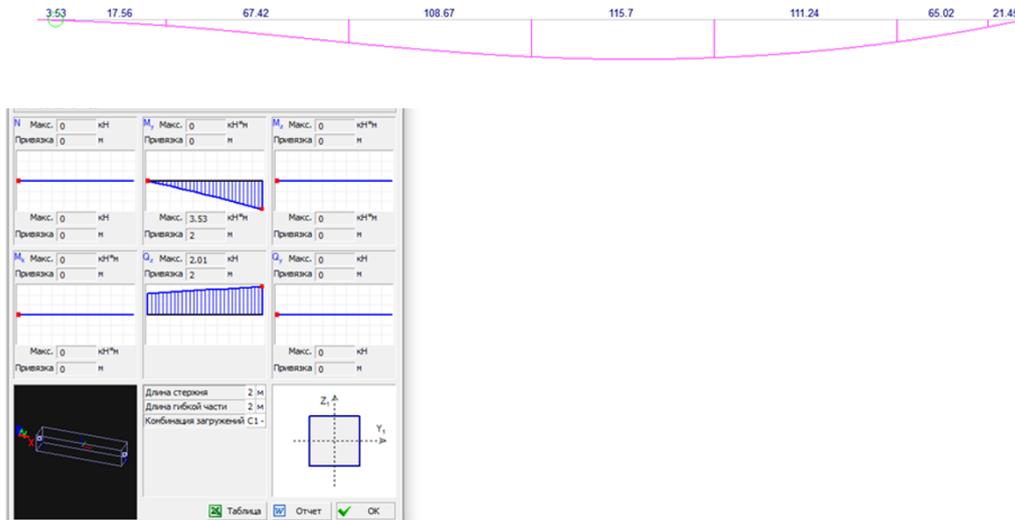


Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов (III ветровой район)

Видно, что при заданной комбинации загружений не возникает подъем покрытия, следовательно, нет ограничений по применению решения кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену в III ветровом районе для типа местности B.

Следует повысить ветровой район до IV района, для которого нормативное значение ветрового давления 480,0 Па. Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенного в IV ветровом районе представлены на рисунке 9.

Действующие на двухшарнирную балку нагрузки приведены на рисунке 10.

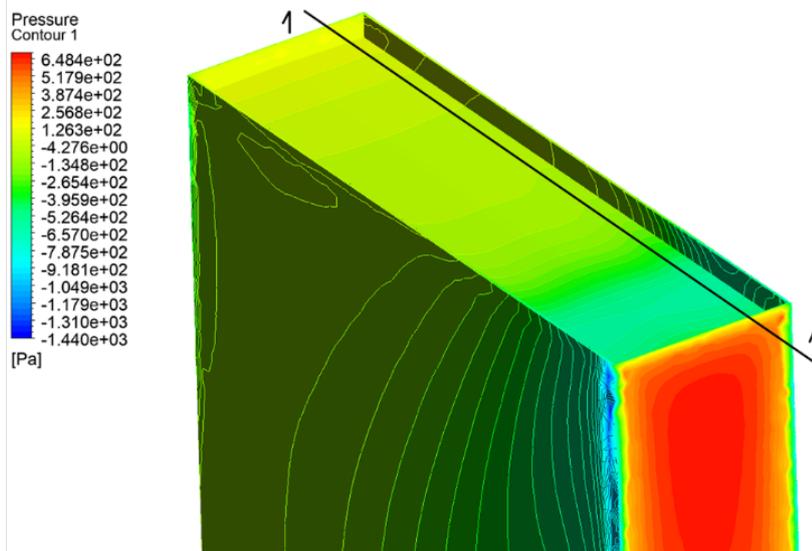


Рис. 9. Значения ветрового давления на покрытие (IV ветровой район)



Рис. 10. Схема приложения нагрузка на балку: верх – нагрузка от собственного веса кровли, низ – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузений, и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 11).

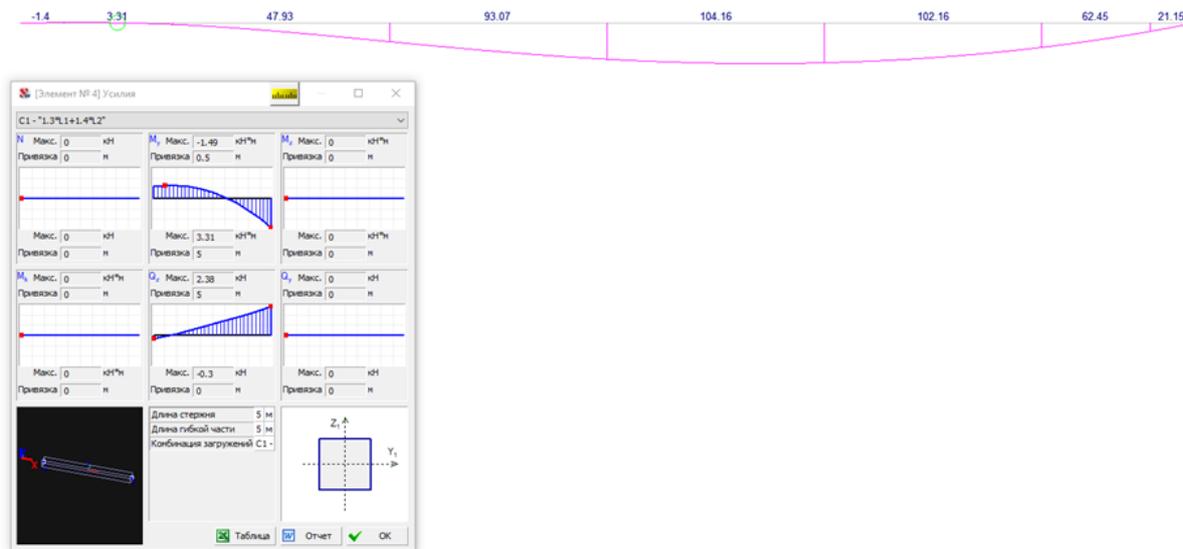


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов (IV ветровой район)

Как видно из рис. 10, от действующей ветровой нагрузки возникают отрицательные изгибающие моменты, что приводит к подъему кровли. Следовательно, необходимо определить возникающие в сечении напряжения и сравнить с допускаемыми.

Расчет производится по формулам балок, работающих на изгиб:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \tag{2}$$

где $M_{\max} = 1,49$ кНм – максимальный изгибающий момент;

W_x – момент сопротивления сечения (утеплитель толщиной 60,0 мм);

$$\sigma = \frac{1,49}{6 \cdot 10^{-4}} = 2483 \text{ кПа} > [\sigma] = 300,0 \text{ кПа}.$$

Следовательно, в IV ветровом районе не рекомендуется к применению на высоте 75,0 метров решение кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену.

Как было исследовано ранее, рассматриваемое кровельное решение возможно применять на здании высотой 75,0 метров в III ветровом районе, следовательно, можно определить скорость

ветра на данной отметке и найти высоту, на которой данная скорость достигается в других ветровых районах, так как ветровое давление зависит от скорости ветровых потоков.

Как видно из таблицы 2, для III ветрового района на высоте 75,0 метров скорость ветровых потоков составляет 30,13 м/с, данная скорость для других районов составляет:

- Для IV района – $z = 41,84$ м;
- Для V района – $z = 23,95$ м;
- Для VI района – $z = 14,67$ м;
- Для VII района – $z = 10,03$ м.

Выводы.

1) Установлена допустимая высота здания в ветровых районах при типе местности В с применением кровельных решений ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ с возможностью допустимого подъема сборной стяжки из хризотилцементных листов (таблица 4) и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену (таблица 5).

2) Максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкции ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ составляет 41,76 м/с для типа местности В.

Таблица 4

Допустимая высота здания в ветровых районах для типа местности В применением кровельного решения ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Высота здания, м	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	51,27

Таблица 5

Допустимая высота здания в ветровых районах типа местности В с применением кровельного решения ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Высота здания, м	75,0	75,0	75,0	41,84	23,95	14,65	10,03

3) Максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкции ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ составляет 31,13 м/с для типа местности В. Для зданий большей высоты применение клей-пены для приклейки плит XPS между собой в кровельном решении ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ является обязательным.

3) Результаты численного моделирования ветровых потоков отличаются от результатов, полученных по формулам действующих нормативных документов, использующие подходы, которые учитывают усредненные значения ветра и предполагаемые аэродинамические коэффициенты. Компьютерное моделирование позволяет учитывать реальные условия окружающей среды, включая турбулентность, особенности формы объекта исследования, а также выявить локальные максимумы давления и напряжения, возникающие в отдельных точках зданий.

4) В связи с тем, что расчетные условия для типа местности С благоприятнее условий расчета для типа местности В, допускается распространять выводы, полученные для типа местности В, на аналогичные районы местности типа С.

5) Современные методы вычислительных исследований предоставляют уникальные возможности для проектирования и анализа строительных конструкций и сооружений или отдельных их элементов. Вместо трудоемких испытаний реальных прототипов, инженеры могут создавать виртуальные модели и тестировать различные сценарии поведения здания, что существенно сокращает сроки разработки проектов. Исследования показывают, что численное моделирование обеспечивает достоверные выходные данные, соответствующие результатам натурных испытаний [16–22], что даёт возможность использовать результаты численных экспериментов при проектировании, а также потенциально при составлении или корректировке сводов правил по проектированию и строительству.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Архитектурно-строительная аэродинамика // Вестник МГСУ. 2017. Т.12, №6. С. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609.
2. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. М.: Изд-во Стройиздат, 1984. 294 с.
3. Chen B., Shang L., Qin M., Chen X., Yang O. Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof, Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.10.019.
4. Gerhardt H.J., Krämer C., Bofah K.K. Wind loading on loosely laid pavers and insulation boards for flat roofs // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146(8). 04020151. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002707.
5. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Замула М.Д. Учет ветрового режима при проектировании жилой застройки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 3. С. 5–13. DOI: 10.14529/build230301.
6. Aly A.M., Khaled F. Aerodynamics of Low-Rise Buildings: Challenges and Recent Advances in Experimental and Computational Methods. 2020. DOI:10.5772/intechopen.92794.
7. Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review // Journal of Building Engineering. 2016. Vol. 6. Pp. 225–235. DOI: 10.1016/j.jobee.2016.01.009.
8. Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., Rajan S.S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building // Build Simul. 2019. Vol. 12. Pp. 891–904. DOI: 10.1007/s12273-019-0514-8.
9. Anirwar R.A. Experimental study of wind-induced pressures on tall buildings of different

shapes // Wind and Structures. 202. Vol. 31(5). Pp. 441–453. DOI:10.12989/was.2020.31.5.441.

10. Zhang Y., Yu Z., Chen X., Cao R., Zhu F.R. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations // Building and Environment. 2020. Vol. 169(3). 106583. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106583.

11. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. М.: Изд-во Мир, 1981. 2-е изд. 408с.

12. Al-Chalabi R., Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise buildings roofs // CSCE 2021 Annual Conference. 2021. Pp. 713.1–713.10.

13. Платонов В.В., Минаков А.В., Дектерев А.А., Харламов Е.Б. Сравнительный анализ CFD-пакетов Sigmaflow и Ansys Fluent на примере решения ламинарных тестовых задач // Вестник томского государственного университета. 2013. Т.1, №21. С. 84–94.

14. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Т. 32, №8. С. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

15. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев.: Изд-во Будильник, 1970. 436 с.

16. Хазов П.А., Анущенко А.М., Онищук Е.А., Щелокова Ю.Д. Численное и экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на криволинейное большепролетное покрытие // Приволжский научный журнал. 2020. Т.53, № 1. С. 16–21.

17. Саиян С.Г., Ефимова А.М. Расчетные аэродинамические исследования комплекса

Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т.19, №6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941;

18. Лампси Б.Б., Шилов С. С., Хазов П.А. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие // Вестник МГСУ. 2022. Т.17, № 1. С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31.

19. Айрапетов А.Б., Вышинский В.В., Катунин А.В. Расчетные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9, № 2. С. 5–12.

20. Kumar A., Verma A. CFD Analysis of The Wind Loads on the ‘+’ Plan Building Structure Including Interference Condition Using ANSYS CFX // Journal of Xidian University. 2023. Vol.17(10). Pp. 50–63. DOI: 10.37896/jxu17.10/004;

21. Verma A., Neeraj C., Singh P.K., Kadian V., Suraj R. Evaluation of Wind Effects on High-Rise Buildings Using Ansys CFX // Journal of Engineering Research and Application. 2023. Vol. 2. Pp. 1–11. DOI:10.55953/jera.2023.2101.

22. Xin L., Zhou X., Gu M. Wind tunnel test and CFD simulation of the near-roof wind speed and friction velocity on gable roofs // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022. Vol. 225(9). DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105009

Информация об авторах

Шилов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры Теории сооружений и технической механики. E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 603950, г. Н. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65;

Уртенков Антон Игоревич, ведущий технический специалист. E-mail: urtenkov@tn.ru. Компания ТехноНИКОЛЬ. 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5;

Молева Алина Александровна, студент. E-mail: alina.moleva52@yandex.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 603950, г. Н. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65;

Поступила 13.05.2025 г.

© Шилов С.С., Уртенков А.И., Молева А.А., 2025

^{1,*}Shilov S.S., ²Urtenkov A.I., ¹Moleva A.A.

¹Nizhny Novgorod State University of architecture and civil engineering

²Company TECHNONICOL

*E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

AERODYNAMIC STUDY OF FLAT ROOFS USING NUMERICAL MODELING

Abstract. With the development of new materials and technologies, it becomes necessary to create new or modernize existing roofing systems. The interaction of roofing systems with wind currents is an important

aspect of design, since increased wind load can exert significant pressure on the roof and cause it to damage or even collapse as a whole or individual elements. The solutions of the roof are TN-UNIVERSAL ROOF without fixing the prefabricated screed into the supporting base and TN-SOLID PROF ROOF without gluing thermal insulation and wedge-shaped XPS plates onto adhesive foam. The study was applied using numerical simulation of wind flows in the Ansys CFX software and computing complex. As a result of the iterative calculation, data on the distribution of wind pressure over the surface of the studied building models were obtained, wind load values were calculated that contribute to the rise of roof layers due to the occurrence of negative wind pressure, the maximum heights of buildings and wind areas for which the coating solutions are acceptable were determined. The maximum speed of wind flows has been revealed, at which the integrity of the TN-UNIVERSAL ROOF and TN-SOLID PROF ROOF structures is maintained in the conditions of building placement on a site belonging to type B terrain. The permissible height of the building has been established in various wind areas when using roofing solutions TN-UNIVERSAL ROOF with the possibility of permissible lifting of a composite screed made of chrysotile cement sheets and TN-SOLID PROF ROOF without gluing XPS plates together on adhesive foam. The research results can be applied in practice in the design of buildings and structures with geometric parameters similar to the model under study.

Keywords: roofing systems, computational fluid dynamics, boundary conditions, wind flows, CFD-modeling, aerodynamics of buildings.

REFERENCES

- Poddaeva O.I. Architectural-building aerodynamics [Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika]. Vestnik MGSU. 2017. Vol.12, No. 6. Pp. 602-609. DOI: 10.2227/1997-0935.2017.6.602-609 (rus).
- Retter E.I. Architectural-building aerodynamics. Monograph [Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika: monografiya]. Moscow: Strojizdat, 1984. 294 p. (rus)
- Chen B., Shang L., Qin M., Chen X., Yang O. Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof, Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.10.019.
- Gerhardt H.J., Krämer C., Bofah K.K. Wind loading on loosely laid pavers and insulation boards for flat roofs. Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146, No. 8. 04020151. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002707.
- Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Zamula M.D. Consideration of wind conditions in the design of residential buildings [Uchet vetrovogo rezhima pri proektirovanii zhiloz zastrojki]. Bulltin SUSU. Series «Construction Engineering and Architecture». 2023. Vol. 23, No 3. Pp. 5–13. DOI: 10.14529/build230301 (rus).
- Aly A.M., Khaled F. Aerodynamics of Low-Rise Buildings: Challenges and Recent Advances in Experimental and Computational Methods. 2020. DOI:10.5772/intechopen.92794.
- Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review. Journal of Building Engineering. 2016. Vol.6. Pp. 225–235. DOI: 10.1016/j.job.2016.01.009.
- Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., Rajan S.S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building. Build Simul. 2019. Vol. 12. Pp. 891–904. DOI:10.1007/s12273-019-0514-8.
- Anirwar R.A. Experimental study of wind-induced pressures on tall buildings of different shapes. Wind and Structures. 202. Vol. 31, No. 5. Pp. 441–453. DOI:10.12989/was.2020.31.5.441.
- Zhang Y., Yu Z., Chen X., Cao R., Zhu F.R. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations. Building and Environment. 2020. Vol. 169, No. 3. 106583. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106583.
- Temam R. The Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis [Uravneniya Nav'e – Stoksa. Teoriya i chislennyj analiz]. Moscow: Mir, 1981. 408 p. (rus).
- Al-Chalabi R., Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise buildings roofs. CSCE 2021 Annual Conference. 2021. Pp. 713.1–713.10.
- Platonov V.V., Minakov A.V., Dekterev A.A., Harlamov E.B. Comparative analysis of CFD Sigmaflow and Fluent Packages by the example of solving laminar test problems [Sravnitel'nyj analiz CFD-paketov Sigmaflow i Ansys Fluent na primere resheniya laminarnyh testovyh zadach]. Tomsk State University Journals. 2013. Vol. 1, No. 21. Pp. 84–94. (rus).
- Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. Pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
- Vajnberg D.V., Vajnberg E.D. Plate calculation [Raschet plastin]. Kiev: Budil'nik, 1970. 436p. (rus).
- Khazov P.A., Anuschenko A.M., Onischuk E.A., Schyolokova Y.D. Numerical and experimental study of the distribution of the wind

load in the curvilinear large-span covering [Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie raspredeleniya vetrovoj nagruzki na krivolinejnoe bol'sheproletnoe pokrytie]. The Privolzhsky Scientific Journal. 2020. Vol. 53, No. 1. Pp. 16–21. (rus).

17. Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings [Raschetnyye aerodinamicheskiye issledovaniya kompleksa Moskovskogo mezhdunarodnogo delovogo tsentra «Moskva-Siti» pri posledovatel'nom vozvedenii zdaniy]. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19, No. 6. Pp. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus).

18. Lamps B.B., Shilov S.S., Khaxov P.A., Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures [Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovykh potokov na bol'sheproletnoe pokrytie]. Vestnik MGSU. 2022. Vol. 17, No 1. Pp. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31. (rus).

19. Ajrapetov A.V., Vyshinskij V.V., Katunin A.V. Numerical and experimental research of high-

rise buildings and structures aerodynamics in the presence of environmental building [Raschetnye i eksperimental'nye issledovaniya obtekaniya vysotnykh zdaniy i sooruzhenij atmosferynym vetrom v usloviyah gorodskoj zastrojki]. Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta. 2017. Vol. 9, No. 2. Pp. 5-12. (rus).

20. Kumar A., Verma A. CFD Analysis of The Wind Loads on the ‘+’ Plan Building Structure Including Interference Condition Using ANSYS CFX. Journal of Xidian University. 2023. Vol. 17, No. 10. Pp. 50–63. DOI: 10.37896/jxu17.10/004.

21. Verma A., Neeraj C., Singh P.K., Kadian V., Suraj R. Evaluation of Wind Effects on High-Rise Buildings Using Ansys CFX // Journal of Engineering Research and Application. 2023. Vol. 2. Pp. 1-11. DOI:10.55953/jera.2023.2101.

22. Xin L., Zhou X., Gu M. Wind tunnel test and CFD simulation of the near-roof wind speed and friction velocity on gable roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022. Vol. 225, No. 9. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105009.

Information about the authors

Shilov, Sergey S. Post graduate student of the Department of Theory of structures and technical mechanics E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 603950, Nizhny Novgorod, 65, Il'inskya St.

Urtencov, Anton Ig. Leading technical specialist. E-mail: urtenkov@tn.ru. company TECHNOMICOL, Moscow, 47, Gilyarovskogo St.

Moleva, Alina Al. Student E-mail: alina.moleva52@yandex.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 603950, Nizhny Novgorod, 65, Il'inskya St.

Received 13.05.2025

Для цитирования:

Шилов С.С., Уртенков А.И., Молева А.А. Аэродинамические исследования плоских крыш при помощи численного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43

For citation:

Shilov S.S., Urtencov A.I., Moleva A.A. Aerodynamic study of flat roofs using numerical modeling. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No.7. Pp. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-44-53

Остроушенко Е.Б.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: zhe_88@mail.ru

ПРАВОСЛАВНЫЕ ХРАМЫ АМУРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НАЧАЛА XX ВЕКА

Аннотация. Статья посвящена изучению одного из слабо исследованных культурных явлений в истории нашей страны – храмового строительства на станциях Транссибирской железнодорожной магистрали. На примере Амурского участка линии производится анализ архитектуры культовых зданий, массово возводимых на железнодорожных станциях в начале XX века. Описываются исторические предпосылки, специфика проектирования и строительства храмов. Производится анализ градостроительного положения, объёмно-планировочного и стилистического решения объектов культового зодчества.

Амурский участок Транссибирской магистрали строился последним и имел стратегическое значение. Возведение храмов на станциях являлось неотъемлемой частью программы комплексного освоения края. Церкви на станциях строились по образцовым проектам из рекомендованных альбомов чертежей. Для ряда станций Амурского участка был специально создан типовый проект церкви, который корректировался при привязке к местности. В структуре станции храмы имели осевое или периферийное положение с пассажирским зданием, располагались на открытых возвышенных местах на пересечении основных планировочных осей населённых пунктов. Они ориентировались на железную дорогу и основные объекты инфраструктуры. Все храмы Амурской железной дороги строились из дерева на каменном фундаменте. Они имели схожую трёхчастную планировочную структуру и состояли в единой связи с колокольной. Основной тип объёмного построения – «восьмерик на четверике» или «четверик на четверике» с завершением в виде шатра или луковичного пятиглавия. Стилистически церкви Амурской железной дороги относятся к неорусскому направлению эклектики и Северному модерну.

Ключевые слова. Транссибирская магистраль, Великий Сибирский путь, Амурская железная дорога, церковное строительство, железнодорожный храм, типовое строительство.

Введение. Постройка Транссибирской магистрали (Великого Сибирского пути) – одно из значимых событий в истории России, определившее основные направления экономического и культурного развития Сибири и Дальнего Востока на рубеже XIX – XX столетий. Рельсовый путь, протяжённостью 9,3 тыс. км, связал воедино территории обширной Российской Империи, «притянув» Сибирь и дальневосточные земли к Европейской России [1]. За 25 лет строительства магистрали была не только установлена связь между дальними регионами страны, но и создана полноценная регулярная система расселения вдоль железнодорожной (ж/д) линии. На необжитых местах появились новые станции с развитой системой жизнеобеспечения, включавшей жилые дома со службами и общественные здания: храмы, школы, больницы, прачечные, бани и пр. [2]. Здания и сооружения Транссибирской магистрали, выполненные в единой стилистике и схожих строительных материалах, по мере передвижения в поезде по ж/д, складывались в цельный ансамбль [3]. Православные храмы, как носители культурной миссии в России, идей самодержавия и народности, играли доминирующую роль в формировании архитектур-

ного облика новых поселений [3, 4]. Церкви являлись центрами культурной и социальной жизни зарождающихся посёлков, что позволяет выделить их, как особо значимые постройки ж/д комплексов магистрали.

Для осуществления строительства на обширной территории, магистраль была поделена на несколько участков: Западно- и Средне-Сибирский, Забайкальский (в т.ч. Кругобайкальский), Амурский и Уссурийский, которые возводились по очереди, начиная из двух конечных пунктов – Владивостока и Челябинска – навстречу друг другу. [5, 6]. Несмотря на повсеместное использование типовых проектов, под влиянием региональных факторов на каждом из участков сложился самобытный архитектурный облик построек ж/д комплекса [7]. Особенно ярко региональное своеобразие проявилось в архитектуре культовых зданий отдалённых линий [8].

Амурский участок – заключительный в истории создания трансконтинентальной ж/д магистрали «через всю страну к Тихому океану» [1] – стал олицетворением передовых идей своего времени [3]. Культовые здания Амурской линии являются примером оптимальной реализации программы церковного и школьного строительства,

а также яркими образцами регионального своеобразия в архитектурном ансамбле Транссибирской магистрали начала XX в. Утрата описываемых объектов культового зодчества, являвшихся композиционным центром градостроительной системы станций, с одной стороны, привела к постепенной деградации пристанционной застройки, а с другой стороны – к потере уникальных памятников истории и культуры, служащих некогда важными ориентирами социальной и духовной жизни края. Воссоздание храмов Амурской линии является важной задачей в деле восстановления культурно-исторического наследия Великого Сибирского пути.

Актуальность исследования определяется особой значимостью объектов культового зодчества Амурской ж/д, как важных градообразующих элементов, носителей культурной миссии и образцов регионального своеобразия в архитектуре.

Цель исследования – выявление историко-архитектурных особенностей православных храмов Амурской ж/д начала XX века. *Задачи* исследования: описать специфику проектирования и строительства храмов на Амурской ж/д; выявить градостроительные принципы их размещения в структуре ж/д станций; проанализировать функционально-планировочные, объёмно-пространственные и стилистические особенности культовых зданий линии; оценить современное состояние исследуемых объектов.

Объектом исследования являются культовые здания (временные и постоянные церкви, молитвенные дома и часовни), построенные на станциях Амурской ж/д в начале XX века. *Предмет* исследования – градостроительные, архитектурные функционально-планировочные, композиционные объёмно-пространственные и стилистические особенности православных храмов Амурской ж/д.

Степень изученности темы. Историко-культурному анализу церковного строительства на Транссибирской магистрали в целом и на Амурской ж/д в частности, посвящены работы А.В. Хобты и Н.А. Магазинера и А.Б. Вульфома. Градостроительная роль культовых зданий в структуре ж/д станций рассмотрена в работах Е.Г. Щёболевой, С.С. Левашко, Н.П. Крадина. Архитектурно-художественный анализ храмов Амурской ж/д проведён в исследованиях Ю.В. Охотниковой. Стилистическому анализу культового зодчества Транссибирской магистрали посвящены работы Е.И. Кириченко. Тему регионального своеобразия в архитектуре зданий и сооружений Великого Сибирского пути исследует в своих работах С.Н. Баландин и Н.П. Журин.

Тема культового строительства вдоль Транссибирской магистрали в трудах отечественных исследователей подробно освещена с точки зрения историко-культурного процесса, описаны общие принципы градостроительного размещения и стилистического оформления храмов при станциях. Малоизученной остаётся тема регионального своеобразия в архитектуре ж/д храмов, которая раскрывается в настоящей статье на примере Амурской ж/д.

Методы и материалы. В статье используется метод исторической реконструкции культовых зданий Амурской ж/д по сохранившимся фотографиям объектов, а также метод комплексного анализа архивных материалов и исторических документов. Основными источниками информации являются чертежи из «Альбомов типовых исполнительных чертежей» изучаемого участка, документы архива РГИА, исторические фотографии, опубликованные в типографических изданиях начала XX в., а также альбомы с видами построек Амурской ж/д периода строительства магистрали.

Основная часть. Амурская ж/д строилась с 1908 по 1916 гг. под общим управлением министра путей сообщения С.В. Рухлова. Вся линия была поделена на 4 строительных участка: Головной (от ст. Куенга до ст. Урюм), Западный (от ст. Урюм до ст. Керак), Средний (от ст. Керак до р. Дия) и Восточный (от р. Дия до ст. Хабаровск) [9]. Руководили строительством на участках инженеры путей сообщения: Ф.Н. Дроздов, Е. Ю. Подруцкий, В. В. Трегубов и А. В. Ливеровский [10].

Станции строились по заранее созданным в Петербурге типовым проектам, адаптированным к условиям конкретной местности. Размеры и тип застройки станций были строго регламентированы, так как обуславливались спецификой обслуживания подвижного состава. Система жизнеобеспечения формировалась исходя из числа работников станции и наличия переселенческого пункта [11]. Организация жизни на новых землях должна была учитывать не только материальные интересы новоприбывших, но и их духовные потребности. В этой связи, важным аспектом в создании Великого Сибирского пути стало церковное строительство на станциях.

Решение проблемы нехватки церквей в ж/д посёлках Амурской линии осуществлялось разнообразными способами: организовывались разъездные причты в специализированном вагоне-церкви, широко использовались переносные (походные) церкви, адаптировались под храмы жилые дома, возводились, по мере возможности, часовни и стационарные церкви [12].

Повсеместно получили распространение типовые проекты храмов, а при них – комбинированный тип здания школы с квартирами для учителя и священника [13]. Для равномерного распределения храмов вдоль линии ж/д, «церковное строительство велось по соглашению с Железнодорожным Управлением, местными переселенческими организациями и под наблюдением Приамурского генерал-губернатора (Н.И. Гродекова) с расчётом на возведение в посёлке при станции не более одной церкви» [14]. Решение о возведении храма на той или иной станции принималось не только исходя из её ранга (класса), но и на основе отчётов начальников строительства ж/д о состоянии церковного вопроса на местах. Учитывалось расстояние до существующих церквей, наличие переселенческого пункта и общее количество верующих [15]. Руководили возведением храмов на станциях начальники строительных участков, а финансирование осуществлялось за счёт благотворительного фонда имени Александра III, кредитов Переселенческого управления и частных пожертвований [12, 16].

Догоняющий характер строительства Амурской ж/д в условиях послевоенного времени и отдалённости участка от крупных городов, а также ряд факторов, связанных с природно-климатическими, географическими, демографическими, экономическими и социальными особенностями региона, оказали большое влияние на подходы к строительству на линии. Церкви и школы относились к плановым постройкам станции, поэтому генпланами будущих поселений для них предусматривалось отведение участка земли в 252 тыс. кв. саженей [17]. На церковном участке располагались храм, дом с квартирами для священника и псаломщика, а также хозяйственные постройки [18] (рис. 1).

Типология культовых сооружений на Амурской линии включала церкви, церкви-школы, молитвенные дома и часовни. Принципиально постройки церковного назначения делились на временные и постоянные. В первую очередь организовывались временные храмы. Для этого жилые дома переоборудовались под временные церкви, молитвенные дома и церкви-школы, строились временные часовни и храмы. По мере поступления средств, начиная с 1913 г., на станциях стали возводить постоянные храмы с сопутствующими постройками (школой и помещениями для причта), а временные церковные здания упразднялись или приспособлялись под иные нужды [14].

Согласно существующим сведениям, в период с 1911 по 1916 гг. на Амурской линии было построено 28 церковных зданий. [12, 14].

Временные церкви в приспособленных помещениях существовали на 8 станциях: Могоча, Амазар, Ерофей Павлович, Уруша, Рухлово, Большой, Невер, Буря (молитвенный дом) и Завитая. В рядовой застройке пристанционного посёлка здание храма выделялось вертикальным акцентом шатровой башни-колокольни над молитвенным помещением и крестом над козырьком главного входа [19].

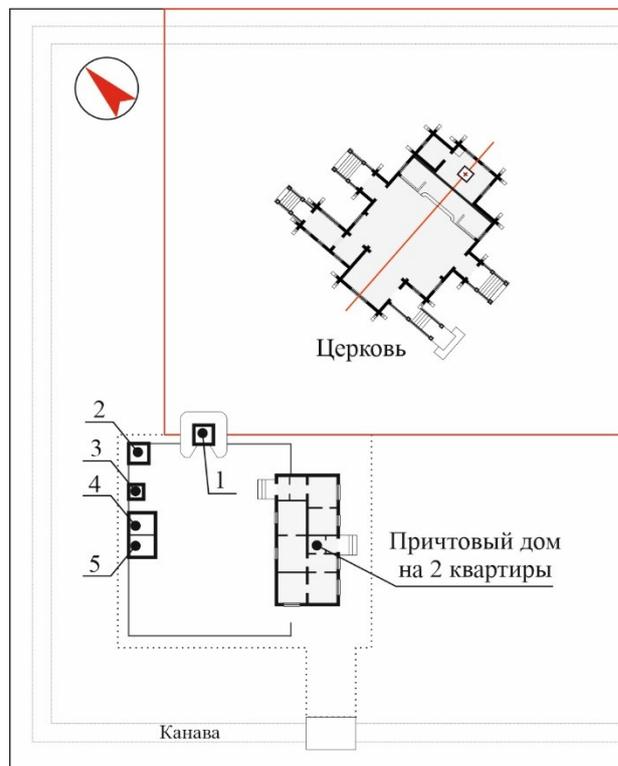


Рис. 1. Схема церковного квартала на ст. Ерофей Павлович.

1 – ледник, 2 – отхожее место, 3 – выгребная яма, 4 – коровник, 5 – сарай

Временные церкви-школы были освящены на 6 станциях: Талдан, Шимановская, Свободный, Магдагачи, Ушумун, Бочкарёво. Они оборудовались в типовых домах типа «Д» (дежурные помещения для паровозных и кондукторских бригад) [8, 14]. Приспособление под церковные нужды заключалось в следующем:

1. Несколько помещений объединялись в одно для размещения школьного класса, в котором по совместительству проводились молитвенные службы;

2. Алтарь устраивался в специальном пристроенном помещении, с возможностью его упразднения, так как его использование впоследствии для жилья было недопустимо;

3. В здании предусматривалось устройство отдельных комнат для причта (учителя, псаломщика и священника) [20] (рис. 2).

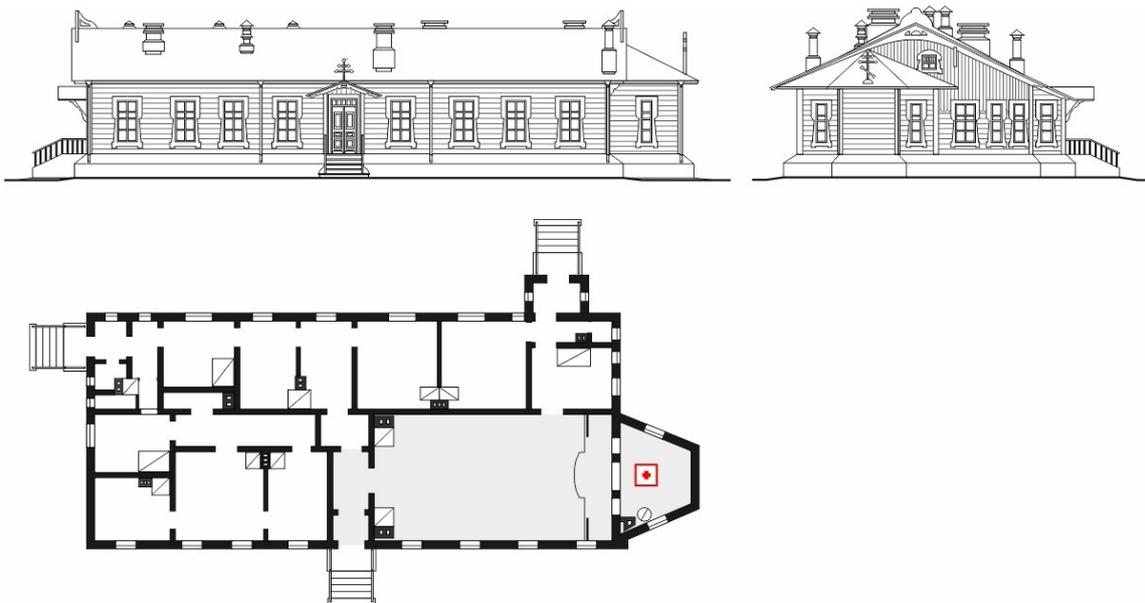


Рис. 2. Дом для церкви-школы на ст. Ушумун

Для станции Ин был создан специальный проект временной часовни и церкви [21]. Согласно альбому «Постройки при железнодорожных станциях», культовые здания представляли собой небольшие каркасные сооружения на свайном фундаменте [22]. Однотипные часовня и цер-

ковь отличались площадью, шириной центрального помещения и наличием алтаря у церкви. Симметричные в плане здания были покрыты металлической двускатной кровлей, а центральный объём выделялся колпаком с небольшой главкой и крестом. Дополнительная глава возвышалась над алтарным помещением церкви (рис. 3).

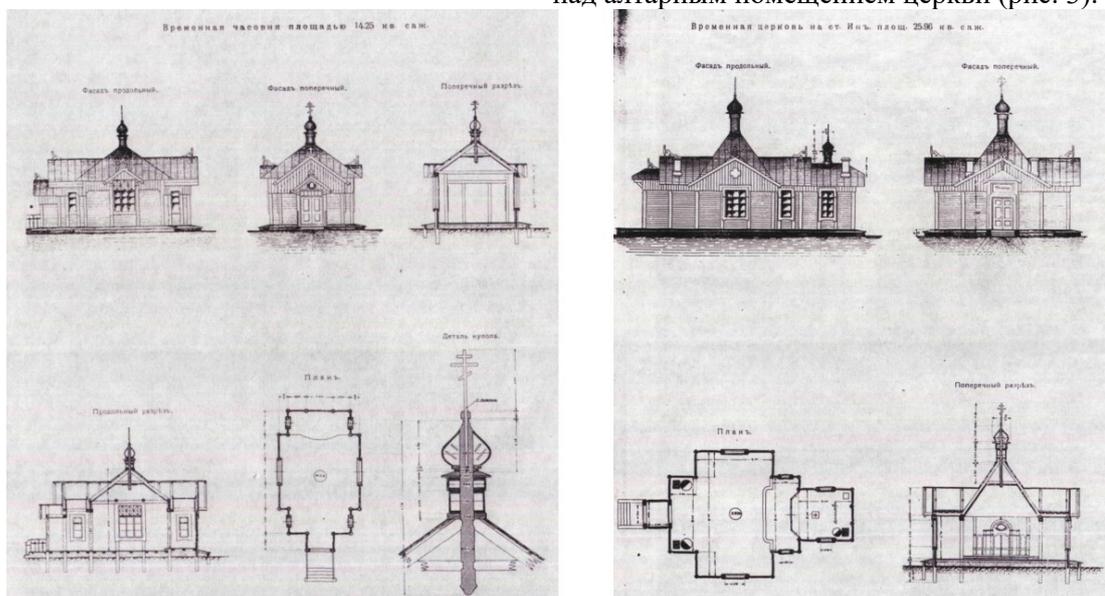


Рис. 3. Временные часовня и церковь на ст. Ин [22]

Постоянные храмы были построены на станциях: Зилово (Троицкая церковь), Ксеньевская (Храм Св. мученика Пантелеймона), Ерофей Павлович (Церковь Св. мученика Иерофея), Талдан (Троицкая церковь), Магдагачи (Церковь Св. равноапостольного князя Владимира), Ушумун (Церковь Свт. Николая Чудотворца), Шимановская (Церковь Свт. Николая Чудотворца), Свободный (Церкви во имя Свт. Николая Чудотворца и во имя Св. равноапостольной княгини Ольги), Белогорск (Троицкая церковь), Архара (Храм Св.

Анастасии Узорешительницы) и Ин (Церковь Покрова Пресвятой Богородицы) [12, 14, 21].

Храм имел важное градостроительное значение на станции, являясь архитектурной доминантой и визуальным ориентиром посёлка [23]. На станциях Амурской ж/д церковное здание могло входить в ансамбль привокзальной площади или являлось центральным элементом комплекса пристанционных построек в стороне от вокзала (рис. 4).

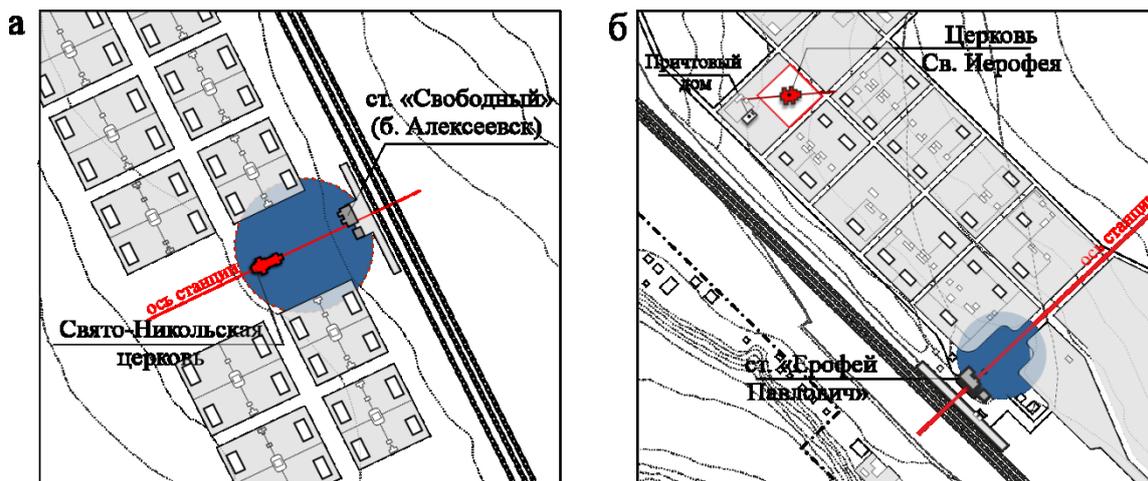


Рис. 4. Схема расположения храма в структуре ж/д посёлка:
 а – в ансамбле привокзальной площади (осевое положение с вокзалом),
 б – в составе ж/д комплекса (периферийное расположение)

В ансамбле привокзальной площади здание церкви располагалось по классической схеме на единой с пассажирским зданием планировочной оси (рис. 4а). В составе ж/д комплекса храм замыкал одну из планировочных осей станции, располагаясь на первой линии от ж/д или естественной возвышенности в глубине посёлка (Рис. 4б). В этом случае церковь могла ориентироваться как традиционно по сторонам света, так и в соответствии с направлением сетки улиц.

Проектная основа постоянных храмов представлена тремя типовыми проектами: 1 – «проект деревянной церкви на 500 человек» (№ 31 из «Атласа планов и фасадов церквей, иконостасов к ним и часовен, одобренных для руководства при церковных постройках в селениях» 1911 г.); 2 – типовой проект церкви 1912 г. (рекомендованный для строительства в населённых пунктах Амурской области); 3 – образцовый проект церкви для Западного участка Амурской ж/д на 300 молящихся (рис. 5).

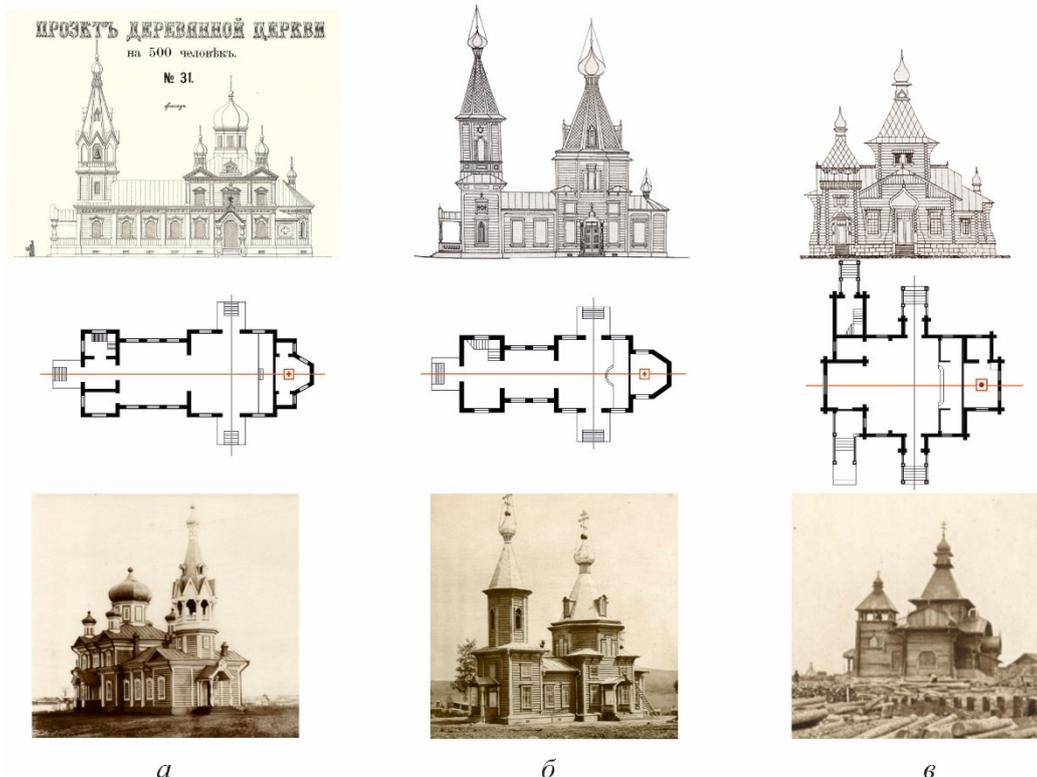


Рис. 5. Постоянные храмы Амурской железной дороги:
 а – Церковь во имя Свт. Николая Чудотворца на ст. Свободный,

б – Церковь Св. Троицы на ст. Талдан, в – Церковь во имя Св. Мученика Иерофея на ст. Ерофей Павлович

Первые два типовых проекта были созданы по аналогии с образцовыми проектами церквей

К. Тона, высочайше одобренных к постройке в отдалённых регионах страны [24]. Третий тип –

проект храма, специально созданный для Западного участка Амурской ж/д [9]. Все культовые постройки возводились из строевого леса местных хвойных пород на каменном (бутовом) фундаменте и покрывались металлической кровлей.

По проекту первого типа в 1913–1914 гг. были построены храмы в честь Свт. Николая Чудотворца на станциях Ушумун и Свободный (рис. 5а), [25].

Функционально-планировочное решение церквей – традиционное для культовых зданий Транссибирской магистрали. Продольно-осевой план имеет трёхчастную структуру, где к квадратному центральному ядру с запада примыкает вытянутый притвор, а с востока – шестигранная алтарная апсида с боковыми помещениями ризницы (дьяконника) и пономарни. Колокольня находится в единой связи с храмом и расположена в башне над притвором. Внутренний объём помещений отражает их функциональную иерархию: от наиболее высокого двусветного пространства центральной части до самых низких объёмов вспомогательных приалтарных помещений. Композиция храма построена на равновесии масс объёмов центральной части и башни колокольни, формирующих вертикальные оси здания. Главный объём – двусветный «четверик», покрытый четырёхскатной кровлей с треугольными фронтонами по углам и завершением в виде луковичного пятиглавия, где центральная глава – световая, а четыре малые – ложные. Многоярусная башня колокольни имеет тип «восьмерик на четверике» и покрыта высоким шатром, украшенным накладной резьбой и декоративными люкарнами, завершающийся небольшой главкой с крестом. Преобладание горизонтальных членений на фасаде придаёт устойчивость всей композиции церкви.

По проекту второго типа были возведены храмы на станциях: Талдан (в честь Живоначальной Троицы), Магдагачи (во имя Св. равноапостольного князя Владимира) и Шимановская (во имя Свт. Николая Чудотворца), освящённые в 1913 г. (Рис. 5б), [21].

Функционально-планировочная структура церквей этого типа схожа с предыдущим описанием. Отличие состоит в меньшей площади здания и отсутствии вспомогательных помещений при алтаре и притворе. Объёмно-пространственное решение построено на ярком контрасте вертикальных и горизонтальных членений здания. Центральное ядро храма, формирующее главную вертикальную ось церкви, представляет собой двухъярусный объём типа «восьмерик на четверике» с полицами по углам, покрытый высокой шатровой кровлей с главкой и крестом. Интерьер центрального объёма хорошо освещался тремя

рядами окон. Башня колокольни, обозначающая вторую вертикальную ось здания, в более упрощённой форме повторяет композиционное решение центрального объёма. При сравнительно компактном плане, здание церкви имеет выраженную высотную композицию, подчеркнутую вертикальными членениями фасада.

Храмы первого и второго типа были построены в едином со всеми постройками ж/д комплекса зданиями неорусском стиле. Декоративное оформление церквей было связано с их местоположением в структуре поселения. В составе ансамбля привокзальной площади церковь не только воспринималась с близкого расстояния, но и в совокупности с сопутствующими постройками (церковно-приходской школой и причтовыми домами). Фасадная плоскость, а в особенности завершения кровли и крылец украшались накладными резными элементами контрастного белого цвета, в схожей манере с декоративным оформлением близлежащих построек. Декоративные элементы, изготовленные для каждой станции своими мастерами, вносят черты национального своеобразия в облик церквей. Периферийное расположение храма на станции обуславливало упрощение декоративной отделки стен в пользу силуэтного восприятия здания. Церковь наилучшим образом воспринималась из окна движущегося поезда в панораме посёлка или в перспективе центральной улицы.

Третьим типом проекта, по которому строились церкви на Амурской ж/д – это специально созданный образцовый проект храма для Западного участка линии. Проект был реализован с поправками на местности на трёх станциях: Зилово (Церковь Живоначальной Троицы), Ксеньевская (Церковь Св. Пантелеймона целителя) и Ерофей Павлович (Церковь Св. мученика Иерофея). Все церковные здания были освящены в 1913 г. (рис. 5в)

Этот проект ярко выделяется на фоне культовой архитектуры не только Амурской линии, но и всей Транссибирской магистрали, так как в его основу легли не образцовые проекты К.Тона, а храмовое зодчество Русского Севера. Выбор прототипа, очевидно, был связан со схожими природно-климатическими условиями регионов. В отличие от преимущественно продольно-осевых церквей Великого Сибирского пути, построенных по аналогии с проектами К.Тона, храм Западного участка имеет асимметричный компактный план, отличающийся рациональным расположением помещений. К центральному ядру в виде прирубов примыкают алтарь с пономарней (с востока), притвор с трапезной (с запада) и квадратная в плане башня колокольни (с северо-запада). Объёмно-пространственное построение

храмов сочетает в себе узнаваемые художественные приёмы культовой архитектуры Русского Севера, положенные на типичные для построек Транссибирской магистрали конструктивные решения. Компактный план в объёмном решении выражен плотно примыкающими друг к другу частями здания, формирующими вдоль вертикальной оси ступенчатую пирамидальную композицию. Центральное помещение имеет наибольшую высоту и представляет собой двухсветный объём типа «четверик на четверике». Нижний ярус центральной части покрыт крещатой бочкой, а верхний – высоким колпаком с полицами. Более низкая башня колокольни, обозначающая второстепенную вертикальную ось, примыкает к основному объёму с угла. Она имеет меньшую высоту и сходное с центральным объёмом завершение.

Стилистически церкви третьего типа отражают традиции Северного модерна. Мотивы этого стиля проявляются в художественном оформлении построек всего ж/д комплекса станций Амурской линии. Бочки, треугольные фронтоны и шатры создают живописный силуэт здания церкви. Изогнутая линия выноса брёвен придаёт композиции храма устойчивость с одной стороны (вынос нижних венцов), и динамику вдоль вертикальной оси с другой стороны (имитация повалов в верхней части сруба). Упрощённое декоративное оформление стен, угловое примыкание колокольни и выразительный силуэт церкви обуславливают восприятие здания преимущественно с дальнего расстояния: из окна движущегося поезда или в перспективе улиц.

Выводы. Таким образом, специфика проектирования и строительства культовых зданий на станциях Амурской ж/д характеризуется: очередностью церковного строительства; применением типового подхода в проектировании; использованию трёх образцовых проектов для постоянных храмов.

В структуре ж/д станции храмы располагались по классической схеме на одной или параллельной планировочной оси с пассажирским зданием. Здание церкви являлось архитектурной доминантой и композиционным центром посёлка, ярко выделяясь в панораме малоэтажной застройки. Для усиления художественно-выразительного эффекта, храмы на некоторых станциях размещают строго по сторонам света. Принцип проницаемости среды выражался в вынесении церковного здания на пересечение планировочных осей станции. Принцип целостной среды определялся комплексным озеленением посёлка и территории храма в частности, а также единым стиливым оформлением построек пристанцион-

ного комплекса. При церкви строились сопутствующие здания школы и жилые помещения для причта.

В качестве основного строительного материала для храмов на станциях Амурской ж/д применялось дерево местных хвойных пород. Принципиально, церкви были двух типов: продольно-осевые, развитые по оси восток-запад, и компактные с асимметричным планом. Они строились в единой связи с шатровой колокольней. Основной объём церковей имел тип «четверик на четверике» или «восьмерик на четверике», и завершался высоким шатром с главкой или композицией в виде луковичного пятиглавия. Небольшие по площади здания храмов были развиты по высоте и имели выразительный силуэт.

Отделка стен и украшение фасадной плоскости зависели от местоположения храма в структуре станции: чем шире радиус её восприятия – тем проще отделка и выразительней силуэт здания. Декоративная отделка храмов перекликалась с украшением школ и других общественных зданий станции. Все постройки ж/д комплекса были выполнены в едином стиле и оформлены согласно колористическому решению своей станции. Национально-художественное своеобразие выражалось в специфическом декоративном оформлении храмов. Церковные здания продольно-осевого типа выполнены в неорусском стиле, а асимметричные – в стиле Северный модерн.

На сегодняшний день из описанных 11 постоянных храмов на линии Амурской ж/д в сильно видоизменённом виде сохранилась единственная церковь – на ст. Свободный (бывш. ст. Алексеевск). Храм с посвящением Св. равноапостольной княгине Ольге с 1947 г. был вновь освящён во имя Свт. Николая Чудотворца. Утрачены и перестроены колокольня и завершение основного объёма церкви, но сохранена общая конфигурация нижнего яруса здания и декоративное оформление дверных и оконных проёмов. На станциях Амурской линии, помимо храмов, постепенно перестраиваются и исчезают исторические пассажирские и жилые здания, некогда составлявшие единый архитектурный ансамбль магистрали и также являющиеся ценными историко-культурными объектами. Для воссоздания уникального архитектурного облика Амурской ж/д необходим комплексный подход с бережным сохранением всех исторических элементов пристанционного посёлка и восстановлением важных градоформирующих зданий, к которым относятся утраченные православные храмы.

Научная новизна проведённого исследования состоит в выявлении архитектурно-художественных особенностей храмов Амурской ж/д,

которые можно использовать при определении предмета охраны и разработке проекта воссоздания историко-культурного наследия Транссибирской магистрали.

Благодарности. Автор благодарит доктора архитектуры Е.Р. Возняк и доктора исторических наук А.В. Хобту за активное содействие в проведении исследовательской деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саблер С.В., Сосновский И.В. Сибирская железная дорога в ее прошлом и настоящем. СПб., 1903. 451 с.
2. Щёболева Е.Г. Ансамбль железной дороги как новый градостроительный организм // Градостроительство России середины XIX начала XX века. М., 2003. Т. 2. С. 470–506.
3. Кириченко Е. И. Русский стиль. Поиски выражения национальной самобытности. Народность и национальность. Традиции древнерусского и народного искусства в русском искусстве XVIII – начала XX века. М. : БуксМАрт, 2020. 580 с.
4. Градостроительство Сибири / Горбачев В.Т., Крадин Н.Н., Крадин Н.П., Крушлинский В.И., Степанская Т.М., Царёв В.И. СПб. : Изд. дом «Коло», 2011. 784 с.
5. Хобта А.В. Строительство Транссиба: очерки истории (конец XIX – начало XX века). Иркутск: ООО НПФ «Земля Иркутская», 2009. 384 с.
6. Витте С.Ю. Собрание сочинений и документальных материалов: в 5 т. Т.1, кн. 2, ч. 1. М., 2004. 646 с.
7. Баландин С.Н. История русских земельельческих поселений в Сибири. Новосибирск, 1984. 83 с.
8. Глатоленкова Е.В. Архитектура жилой среды в поселениях вдоль Китайско-Восточной железной дороги // Урбанистика. Хабаровск, 2020. № 1. С. 34–48. DOI: 10.7256/2310-8673.2020.1.32316
9. Альбом типовых исполнительных чертежей постройки Западной части Амурской ж.д. Петроград: Техническая чертёжная Багинского, 1915. 94 с.
10. Вульф А.Б. История железных дорог Российской Империи. Всё-таки строить! М.: РИПОЛ классик, 2016. 744 с.
11. Жулин Н.П. Школы и церкви на Великом Сибирском железнодорожном пути (о деятельности фонда императора Александра III) // Баландинские чтения. Новосибирск, 2012. Т. IX. № 1. С. 239–247.
12. Магазинер Н.А. Железнодорожные храмы Транссибирской магистрали (конец XIX – начало XX в.). СПб.: Изд-во «Реноме», 2016. 216 с.
13. РГИА. Ф. 1273. Оп. 1 Д. 457.
14. Хобта А.В. Церковное строительство на Транссибе. Конец XIX в. – 1917 г. Тверь: Тверская фабрика печати, 2017. 128 с.
15. Хобта А.В. Хроника церковного строительства на Транссибе (конец XIX – 1917 г.). Иркутск.: ВСЦНТИБ ВСЖ – филиал ОАО «РЖД», 2013. 80 с.
16. РГИА. Ф. 1273. Оп. 1. Д. 515.
17. Вошинин В.П. Переселение и землеустройство в Азиатской России : сборник законов и распоряжений. Пг.: Тип. Петроград. тюрьмы, 1915. 509 с.
18. РГИА. Ф. 350. Оп. 4. Д. 821. Л.5.
19. Альбом видов постройки Средней части Амурской железной дороги : 1910-1914 гг. Т.1. М. : Товарищество "Образование", 1914. 107 л.
20. РГИА. Ф. 350 Оп. 4. Д. 1326.
21. Охотникова Ю.В. Православное храмовое Зодчество юга Дальнего Востока России. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. ун-та, 2014. 200 с.
22. РГИА ДВ. Ф. 702. Оп. 3. Д. 432.
23. Лешко С.С. Градостроительная и храмо-строительная политика России на русском Дальнем Востоке и в Маньчжурии во второй половине XIX - первой трети XX века // Вестник Дальневосточной государственной научной библиотеки. Хабаровск, 2009. № 3(44). С. 118–130.
24. РГИА. Ф. 216. Оп. 2. Д. 175.
25. Атлас планов и фасадов церквей, иконостасов к ним и часовен, одобренных для руководства при церковных постройках в селениях. М. : Изд-во Святейшего Синода, 1911. 50 л.

Информация об авторе

Остроушенко Евгения Борисовна, аспирант-выпускник кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: zhe_88@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 30.04.2025 г.

© Остроушенко Е.Б., 2025

Ostroushenko E.B.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: zhe_88@mail.ru

ORTHODOX TEMPLES OF THE AMUR RAILWAY AT THE BEGINNING OF 20th CENTURY

Abstract. *The article is devoted to one of the poorly studied cultural phenomena of the history of our country - church building at the stations of the Trans-Siberian Railroad. At the example of the Amur section of the railroad, an analysis of the architecture of the temples erected at the railway stations in the beginning of 20th century is made. Historical background, specifics of design and construction of churches are described. An analysis of the urban planning situation, volumetric-planning and stylistic solution of religious architecture objects is made.*

The Amur section of the Trans-Siberian Railroad was the last to be built. It has a strategic importance. The construction of churches at stations was a part of the program of comprehensive development in the region. Churches at stations were built according to typical projects from recommended albums. For a number of stations of the Amur Railroad, a standard church project was specially created. This project was adjusted according to local conditions. In the structure of the station the churches had an axial or peripheral position with the railway station. They were located in open elevated places at the intersection of the main planning axes of the stations. They were oriented towards the railway and the main infrastructure facilities. All the churches of the Amur Railroad were built of wood on a stone foundation. They had a similar three-part planning structure and were in a single connection with the bell tower. The main type of volumetric construction is "octagon on quadrangle" or "quadrant on quadrangle" with a top in the form of a tent or onion-shaped five-domed dome. Stylistically, the churches of the Amur Railroad belong to the neo-Russian direction of eclecticism and Northern Art Nouveau style.

Keywords. *Trans-Siberian Railroad, Great Siberian Railway, Amur Railroad, temple construction, railroad temple, standard construction.*

REFERENCES

1. Sabler S.V., Sosnovskij I.V. The Siberian Railway in its past and present. [Sibirskaya zheleznaya doroga v ee proshlom i nastoyashchem]. SPb., 1903. 451 p. (rus)
2. Shchyoboleva E.G. The railway ensemble as a new urban planning organism. [Ansambl' zheleznoj dorogi kak novyj gradostroitel'nyj organizm]. Urban development of Russia mid 19th – early 20th century. [Gradostroitel'stvo Rossii serediny 19 nachala 20 veka.] M., 2003. Vol. 2. Pp. 470–506. (rus)
3. Kirichenko E.I. The Russian style. [Russkij stil']. M. : BuksMArt, 2020. 580 p. (rus)
4. Urban development of Siberia. [Gradostroitel'stvo Sibiri]. Gorbachev V.T., Kradin N.N., Kradin N.P., Krushlinskij V.I., Stepankaya T.M., Caryov V.I. SPb. : Izd. dom «Kolo», 2011. 784 p. (rus)
5. Hobta A.V. Construction of the Trans-Siberian Railway: Essays on History (late 19th – early 20th century). [Stroitel'stvo Transsiba: ocherki istorii (konec XIX – nachalo XX veka)]. Irkutsk: OOO NPF «Zemlya Irkutskaya», 2009. 384 p. (rus)
6. Vitte S.U. Collection of works and documentary materials. [Sobranie sochinenij i dokumental'nyh materialov]. Vol.1, b. 2, ch. 1. M., 2004. 646 p. (rus)
7. Balandin S.N. The history of Russian agricultural settlements in Siberia. [Istoriya russkikh zemledel'cheskikh poselenij v Sibiri]. Novosibirsk, 1984. 83 p. (rus)
8. Album of typical executive drawings for the construction of the Western part of the Amur railway. [Al'bom tipovyh ispolnitel'nyh chertezhej postrojki Zapadnoj chasti Amurskoj zh.d.]. Petrograd.: Tekhnicheskaya chertyozhnaya Baginskogo, 1915. 94 p. DOI: 10.7256/2310-8673.2020.1.32316 (rus)
9. Vul'fov A.B. History of the railways of the Russian Empire. Let's it build! [Istoriya zheleznih dorog Rossijskoj Imperii. Vsyotaki stroit!'] M.: RIPOL klassik, 2016. 744 p. (rus)
10. Glatolenkova E.V. Architecture of the residential environment in settlements along the Chinese Eastern Railway. [Arhitektura zhiloj sredy v poseleniyah vdol' Kitajsko-Vostochnoj zheleznoj dorogi]. Urbanistika. Habarovsk, 2020. No. 1. Pp. 34-48. (rus)
11. Zhurin N.P. Schools and churches on the Great Siberian Railway (about the activities of the Emperor Alexander III Foundation). [Shkoly i cerkvi na Velikom Sibirskom zheleznodorozhnom puti (o deyatelnosti fonda imperatora Aleksandra III)]. Balandin Readings. Novosibirsk. 2012. Vol. IX. No 1. Pp. 239–247. (rus)
12. Magaziner N.A. Railway temples of the Trans-Siberian Railway (late 19th – early 20th century). [Zheleznodorozhnye hramy Transsibirskoj magistrali]. SPb.: «Renome», 2016. 216 p. (rus)

13. RSHA. Fund 1273. Inv. 1. File 457. (rus)
14. Hobta A.V. Church construction on the Trans-Siberian Railway. Late 19th century – 1917. [Cerkovnoe stroitel'stvo na Transsibe. Konec XIX – 1917 g]. Tver': Tver Printing Factory, 2017. 128 p. (rus)
15. Hobta A.V. Chronicle of church construction on the Trans-Siberian Railway (late 19th century – 1917). [Hronika cerkovnogo stroitel'stva na Transsibe (konec XIX – 1917 g.)]. Irkutsk. : PC "Russian Railways", 2013. 80 p. (rus)
16. RSHA. [RGIA]. Fund 1273. Inv. 1. File 515. (rus)
17. Voshchinin V.P. Resettlement and land management in Asian Russia: a collection of laws and regulations. [Pereselenie i zemleustrojstvo v Aziatskoj Rossii : sbornik zakonov i rasporyazhenij]. Pg.: Tip. Petrograd. tyur'my, 1915. 509 p. (rus)
18. RSHA. [RGIA]. Fund 350. Inv. 4 File 821. 5 p. (rus)
19. Album of views of the construction of the Middle Section of the Amur Railway: 1910-1914. [Al'bom vidov postrojki Srednej chasti Amurskoj zheleznoj dorogi : 1910-1914]. Vol.1. M. : "Education" partnership, 1914. 107 p. (rus)
20. RSHA. [RGIA]. Fund 350 Inv.4 File.1326.
21. Ohotnikova U.V. Orthodox Church Architecture of the South of the Russian Far East. [Pravoslavnoe hramovoe Zodchestvo yuga Dal'nego Vostoka Rossii]. Habarovsk: Pacific National University Press, 2014. 200 p. (rus)
22. RSHA FE. [RGIA DV]. Fund.702. Inv. 3. File 432. (rus)
23. Levoshko S.S. Urban development and temple construction policy of Russia in the Russian Far East and Manchuria in the second half of the 19th - first third of the 20th century. [Gradostroitel'naya i hramostroitel'naya politika Rossii na russkom Dal'nem Vostoke i v Man'chzhurii vo vtoroj polovine XIX - pervoj treti XX veka]. Vestnik Dal'nevostochnoj gosudarstvennoj nauchnoj biblioteki. Habarovsk, 2009. No. 3(44). Pp. 118–130. (rus)
24. RSHA. [RGIA]. Fund. 216. Inv. 2. File. 175. (rus)
25. Atlas of plans and facades of churches, iconostases for them and chapels, approved for guidance in church buildings in villages. [Atlas planov i fasadov cerkvej, ikonostasov k nim i chasoven, odobrennyh dlya rukovodstva pri cerkovnyh postrojках v seleniyah]. M. : Holy Synod Publishing House, 1911. 50 p. (rus)

Information about the author

Ostriushenko, Evgeniia B. Postgraduate student. E-mail: zhe_88@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, the 2nd Krasnoarmeiskaya street, Apt. 4

Received 30.04.2025

Для цитирования:

Остроушенко Е.Б. Православные храмы амурской железной дороги начала XX века // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 44–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-44-53

For citation:

Ostroushenko E.B. Orthodox temples of the Amur railway at the beginning of 20th century. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 44–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-44-53

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-54-68

Спирин П.П.

Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства (ООО «НИИ ПГ»)
Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства
и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России)
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
*E-mail: pavelsp@list.ru

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

Аннотация. Объектом исследования является территория Архангельской области, пространственное развитие которой определено ее расположением в северных широтах и приморским положением, обеспечивающим выход к арктическим морям. Для Архангельской области характерны неравномерность распределения урбанизированных территорий, значительные диспропорции в социально-экономическом развитии муниципальных образований. Выбор оптимальной модели территориальной организации региона, как цели исследования, направлен на обеспечение устойчивого и сбалансированного пространственного развития, сокращение межмуниципальных различий в уровне и качестве жизни людей, обеспечение условий для инновационного развития экономики региона и привлечения инвестиций. К основным задачам пространственного развития Архангельской области автор относит оптимизацию системы расселения (в том числе сельского) и формирование зон и точек активности экономической деятельности, направленное на усиление конкурентных позиций региональной политики. Главные региональные планировочные центры представлены городскими агломерациями (Архангельской и Котласской), формирующими две внутрорегиональные системы расселения. На основании проведенного исследования разработана модель пространственной организации Архангельской области, к приоритетным направлениям пространственного планирования региона отнесено развитие транспортно-планировочных осей регионального и межмуниципального уровня, определяющих устойчивое развитие опорных городских и сельских населенных пунктов Архангельской области. Методология исследования основана на использовании системного подхода в анализе процессов градостроительного развития территории субъекта Российской Федерации. В изучении развития пространственных систем, взаимодействия их структурных составляющих использованы такие методы системного анализа, как аналитические, логические, графические и моделирование. Использование системного научно-методического подхода позволило выявить общие закономерности пространственного развития региона, как целостного объекта, а также его конкретных систем. Обоснована роль применения каркасных моделей при планировании пространственного развития региона. Рассмотрены каркасы расселения, транспортно-планировочный, экологический и историко-культурный каркасы территории Архангельской области и предложена система мер по оптимизации структуры расселения и формированию опорных населенных пунктов.

Ключевые слова: пространственное планирование, Архангельская область, внутрорегиональная специфика, планировочная организация, каркас расселения, опорные населенные пункты, агломерация.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р утверждена Стратегия пространственного развития России до 2030 г. с прогнозом до 2036 г. В числе ее целей - формирование сбалансированной системы пространственного развития для достижения национальных целей, поиск оптимальных форм территориальной организации экономики, развитие опорных населенных пунктов, образующих инфраструктурный и экономический каркас страны [1]. В разрезе субъектов Российской Федерации требуется детализация ее положений с учетом специфики физико-географического положения и ресурсной базы каждого региона, его роли в реализации национальных целей развития Российской Федерации. Однако в настоящее

время недостаточно внимания уделяется научному обоснованию пространственного развития регионов страны с учетом особенностей их географического положения и природно-ресурсного потенциала [2].

Базовым документом стратегического планирования на региональном уровне является стратегия социально-экономического развития субъекта Российской Федерации, в рамках которой должен разрабатываться пространственный блок, определяющий приоритеты территориального планирования. Пространственное планирование каждого из регионов должно быть направлено на оптимизацию сложившейся системы расселения, регулирование размещения и развития производительных сил, транспортной, энергети-

ческой, информационно-коммуникационной, социальной инфраструктур, обеспечение экологической безопасности и сохранение природного и культурного наследия региона.

Областным законом от 18.02.2019 № 57-5-оз «Об утверждении стратегия социально-экономического развития Архангельской области до 2035 года» определены цели и приоритеты развития области на долгосрочную перспективу, а главная стратегическая цель отражает миссию региона, как центра Русского Севера [3]. Основными задачами пространственного развития, согласно данному документу, являются: оптимизация системы расселения; развитие арктических территорий; развитие инженерно-транспортной инфраструктуры, ведущих секторов экономики и сельскохозяйственного производства; создание благоприятных условий для жизнедеятельности населения, развитие природно-экологического каркаса.

Цель настоящего исследования: разработка модели пространственного развития Архангельской области, как базовой основы Схемы территориального планирования региона. Концепция пространственного развития Архангельской области содержит научное обоснование вариантов размещения объектов регионального значения, предложения по градостроительному развитию муниципальных образований области, оптимизации системы расселения и размещения производительных сил, определению зон активизации экономической деятельности и опорных населенных пунктов. Схема территориального планирования Архангельской области, в свою очередь, обеспечивает градостроительные условия для долгосрочного устойчивого сбалансированного развития региона, оптимального использования территориальных и иных ресурсов, инфраструктурного потенциала, сохранение природного и культурного наследия региона. Таким образом, пространственное планирование является одним из ключевых инструментов регулирования социального, территориального и экономического развития региона с учетом его пространственной организации [4].

Специфика пространственной организации территории Архангельской области определяется ее физико-географическим положением, исторически сложившимися особенностями экономического освоения территории, очаговым размещением основных населенных пунктов и малой освоенностью огромной по площади территории, преимущественно покрытой лесами. Большая площадь (589,9 тыс. кв. км) и протяженность области в меридиональном и широтном направлениях обуславливает существенные различия природно-климатических условий северных и

южных районов, что определяет внутрирегиональную специфику условий жизнедеятельности населения, расселения и экономического потенциала территории.

Методология исследования основана на использовании пространственного подхода к анализу и прогнозу развития таких сложных территориальных систем, как расселение, производительные силы, инфраструктурная обеспеченность территории, природно-экологический каркас [5, 6, 7].

Ключевым пространственным преимуществом Архангельской области является ее приморское положение и выход к арктическим морям. На территории области стыкуются такие важнейшие транспортные коридоры, как Северный морской путь и Международный транспортный коридор «Север-Юг», связывающий Европу и Азию. Перспективы развития транспортного каркаса Российской Федерации предусматривают развитие на территории Архангельской области внутрироссийских и международных транспортных коридоров, что создаст условия для развития и внутрирегиональной транспортной и логистической инфраструктуры (рис. 1).

Развитие Архангельской области непосредственно связано с Арктической зоной Российской Федерации. Семь муниципальных образований региона включены в состав Арктической зоны (*Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 № 296 (ред. от 05.03.2020 <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201405050030>)*) (37,8 % от общей площади области) [8]. В настоящее время на арктических территориях Архангельской области проживает 608,5 тыс. человек, из них городское население составляет 596,2 тыс. человек (97,9 %), а г. Архангельск – самый крупный по численности населения город мировой Арктики (301,4 тыс. чел).

Формирование опорной зоны Арктики в Архангельской области скажется на политической значимости территории области, усилит инвестиционную привлекательность территории, обеспечит развитие региональных аспектов социальной сферы, развитие инфраструктуры, создание новых предприятий, развитие туризма. Эффективное государственное управление развитием арктических территорий будет способствовать формированию устойчивых системных взаимосвязей экономической деятельности во всем регионе [9].

Особенности сложившейся системы расселения Архангельской области определены природными, историческими и социально-экономическими факторами. Для Архангельской области характерна значительная неоднородность распределения населения по территории, что в

первую очередь связано с природными условиями и ресурсным потенциалом территории (рис. 2).

Расположение значительной части Архангельской области в лесной зоне привело к формированию большого количества сельских и многих городских населенных пунктов на базе лесного хозяйства, лесозаготовок и лесопереработки. Малая величина основной части сельских населённых пунктов также связана со специ-

кой организации лесозаготовок. Население сконцентрировано в городских округах (за исключением городского округа Новая Земля) и в городских населенных пунктах на юге области с более благоприятными природно-климатическими условиями. Дисперсное расселение и низкая плотность населения (менее 0,5 чел./км²) характерны для северо-восточных районов области – Мезенского и Лешуконского районов, а также городского округа Новая Земля [10].



Рис. 1. Географическое и геополитическое положение Архангельской области
 Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

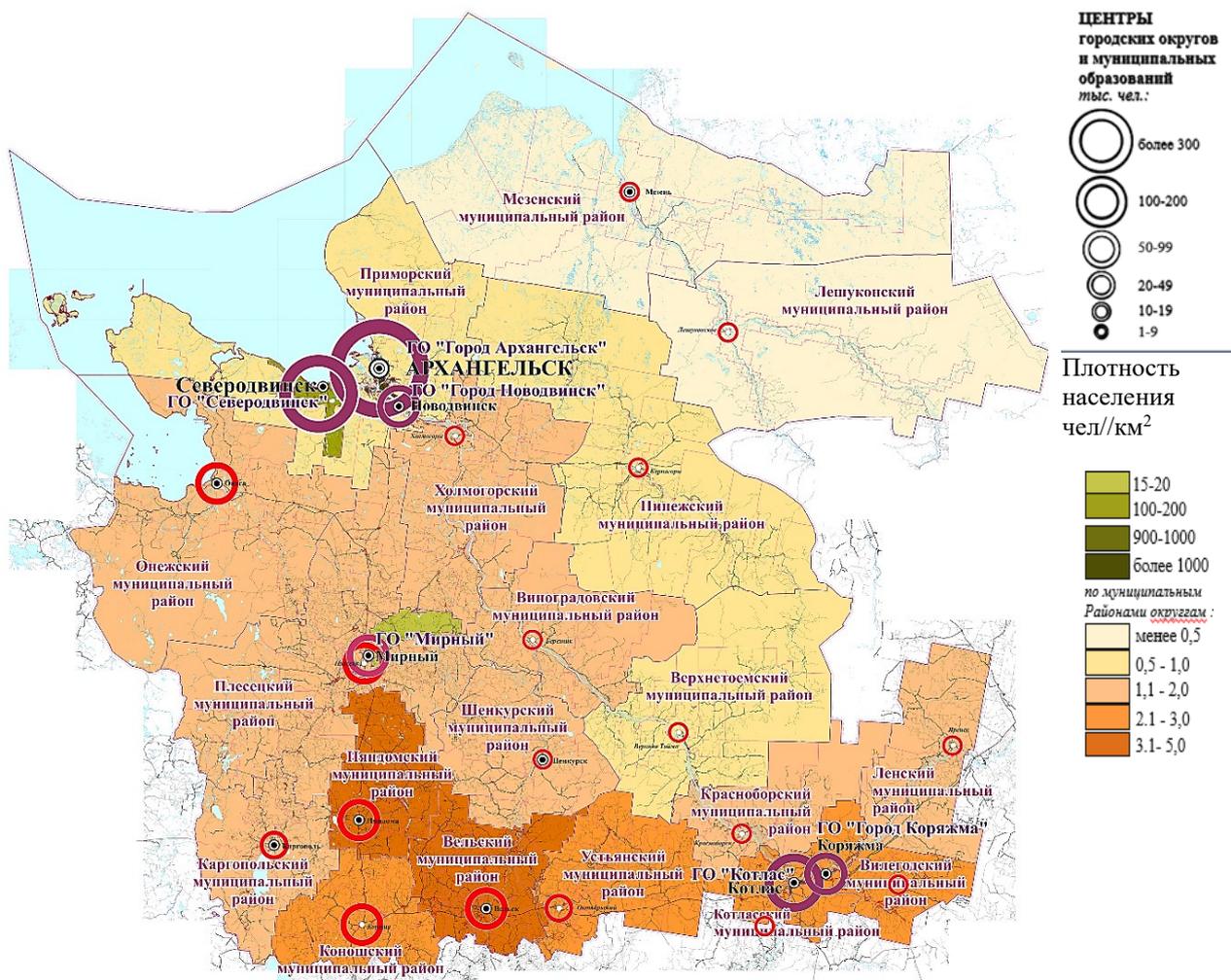


Рис.2. Распределение плотности населения по территории Архангельской области
 Источник: Презентация П.П. Спирина Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

В целом Архангельская область характеризуется высоким уровнем урбанизации, доля городского населения по состоянию 01.01.2024 составляет 78,1 % от общей численности населения области (995,9 тыс. чел). В последние годы в области отмечается усиление миграционных процессов: отток населения из малых сельских населенных пунктов в районные и межрайонные центры расселения, что приводит к росту численности городского населения. Интеграция урбанизированной и сельской местностей реализуется в зонах хозяйственного тяготения к г. Архангельск и г. Котлас, где в настоящее время сформировались две региональные агломерации.

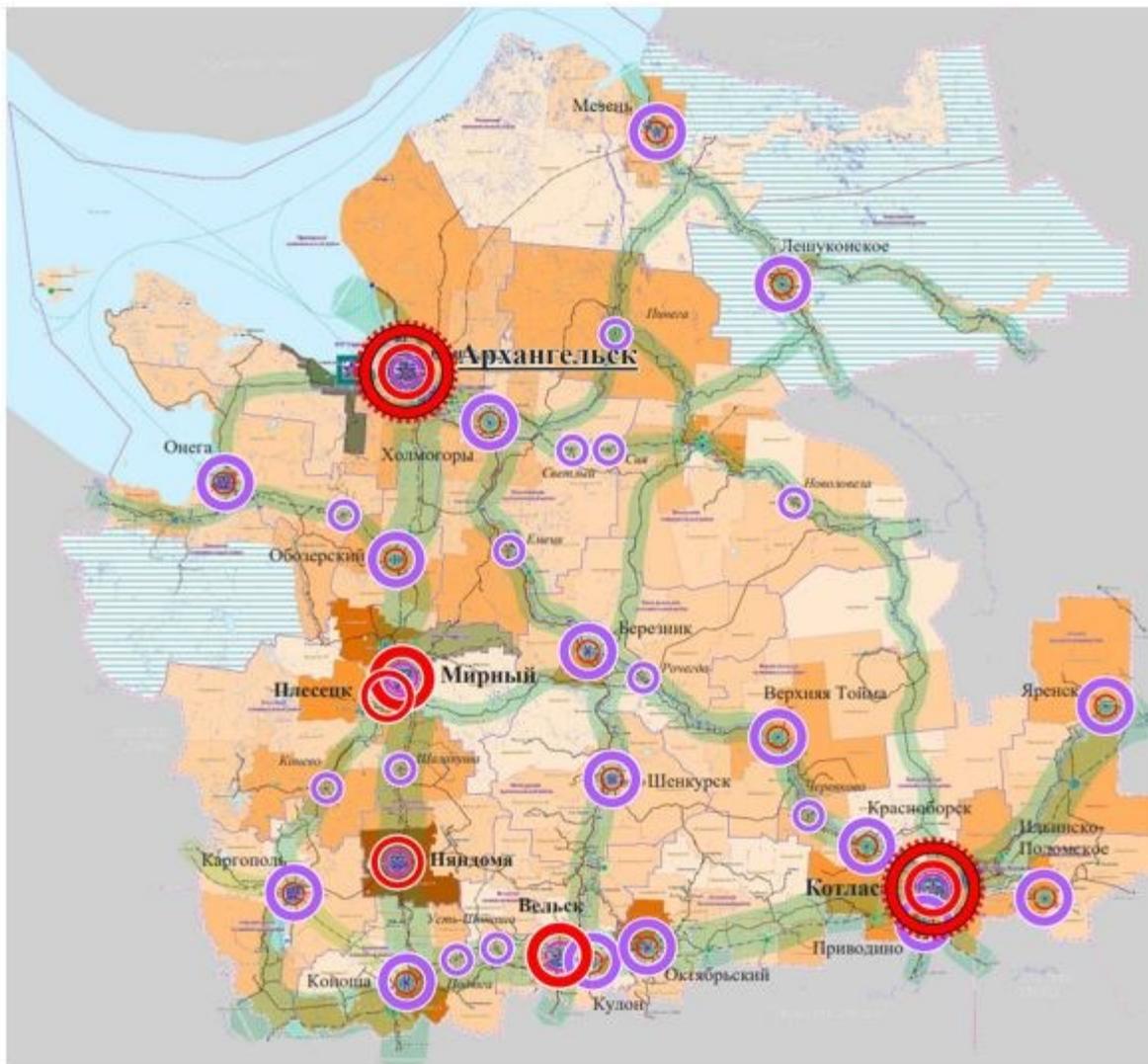
Планировочные оси расселения сформированы основными и второстепенными транспортными коммуникациями и природными осями вдоль судоходных рек (Северная Двина, Онега, Мезень, Пинега). Основной природной осью является р. Северная Двина, на берегах которой расположено два основных центра расселения – г. Архангельск и г. Котлас. Основные планировочные оси сформированы железнодорожными

путями, связывающими г. Архангельск с южными районами области (пгт. Коноши) и железной дорогой широтного направления на юге области, а также автомобильной дорогой федерального значения М-8 «Холмогоры». Второстепенные оси расселения представлены региональными и межмуниципальными автомобильными дорогами. Опорный каркас расселения формируется сетью крупных и функционально значимых населенных пунктов (межрайонных и районных центров расселения), неравномерно расположенных по территории (рис. 3).

Очевидно, и в дальнейшем формирование структуры расселения будет сопровождаться концентрацией городского и сельского населения в зонах влияния городов Архангельск и Котлас, а также в межрайонных и районных центрах расселения [11]. С другой стороны, в соответствии с целями устойчивого развития муниципальных образований, особенно сельских, актуально сохранение структуры расселения и создание условий для развития социально-экономиче-

ского потенциала территорий вне зон влияния городов – опорных центров расселения. Цели пространственного планирования Архангельской

области направлены на повышение эффективности использования пространственного фактора в усилении конкурентных позиций региональной политики.



Центры систем расселения



Опорный каркас расселения



Рис. 3. Опорный каркас системы расселения. Современное состояние
 Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

Как показал анализ современного состояния, для Архангельской области в силу особенностей

планировочной организации территории, преобладания дисперсного характера расселения боль-

шое значение приобретает формирование межрайонных систем расселения. В Архангельской области выделяются следующие центры формирующихся межрайонных систем расселения: - г. Архангельск; г. Котлас; г. Мирный (подцентр - пгт Плесецк); г. Вельск (подцентр – г. Нядома). Эти центры расширяют свое влияние на несколько муниципальных образований (городской округ, муниципальный округ, муниципальный район) и выполняют социально-экономические, культурно-бытовые и другие функции. В межрайонных центрах расселения, перечисленных выше, будут сосредоточены объекты социальной и транспортной инфраструктуры для группы районов, что позволит создавать экономически рентабельные объекты инфраструктуры.

К приоритетным мероприятиям по развитию межрайонных систем расселения отнесены:

- развитие системы межрайонных функций, формирование центров предоставления государственных и муниципальных услуг;
- определение перечня объектов социальной, транспортной и коммунальной инфраструктуры, имеющих межмуниципальное значение;
- согласованное развитие различных отраслей социальной инфраструктуры;
- оптимизация транспортных связей и повышение качества автомобильных дорог, развитие водного транспорта;
- повышение транспортной связности с межрайонным центром.

Чрезвычайно важно для развития межрайонных систем расселения решение транспортных проблем: оптимизация транспортных связей и повышение качества автомобильных дорог, развитие водного транспорта, повышение транспортной связности населенных пунктов с межрайонными центрами. Следует отметить очень низкое качество дорог общего пользования регионального и местного значения в Архангельской области

(<https://pravdasevera.ru/2023/07/03/64a261c31c5e58558c760a82.html?ysclid=m8mv539jxx345232253>), что негативно сказывается на транспортной связности населенных пунктов. Многие сельские населенные пункты не имеют автодорожной связи с районными центрами, зачастую в труднодоступных районах области единственным видом сообщения является внутренний водный транспорт, что требует развития инфраструктуры водного транспорта, в том числе строительство паромных переправ.

Для укрепления каркасной транспортной системы необходимо развитие сети автомобильных дорог регионального и межрайонного значения, объектов внутреннего водного транспорта, стро-

ительство и реконструкция которых предусматривается и на отдаленных от центра территориях области (рис. 4).

К сожалению, железнодорожные проекты, планируемые к реализации на территории Архангельской области, пока не получают развития, например, железнодорожная линия Карпогоры – Вендинга, которая дала бы развитие с. Карпогоры, как опорному населенному пункту для северо-восточных районов области. К реализации намечена реконструкция существующей сети аэропортов, развитие малой авиации, необходимой для обеспечения у транспортной связи с труднодоступными местностями Архангельской области.

Постепенно, по мере развития пространственного транспортного каркаса территории сеть региональных и межмуниципальных дорог области будет становиться более разветвленной, обеспечивая возможности для более полного использования потенциала территории (в том числе природно-рекреационного и лесного).

К особенностям территориальной организации экономики Архангельской области с учетом ее северного и приморского положения следует отнести: низкий уровень освоения территорий, низкую территориальную плотность объектов экономики, наличие монопрофильных муниципальных образований, концентрацию экономической деятельности в городах и поселках городского типа. При этом, на территории области, в Архангельской агломерации, формируется опорная зона Арктики, где реализуются крупнейшие инфраструктурные проекты страны, направленные на развитие транспортно-логистической системы Арктической зоны. Реализация арктических проектов должна стать импульсом для социально-экономического развития области, при этом необходимо взаимоувязывание действующих инструментов территориального и отраслевого развития, которое осуществляется в рамках пространственного планирования.

Современная структура экономики Архангельской области представлена такими отраслями как машиностроение (судостроение), лесопромышленный комплекс, рыболовство, добывающая промышленность и др. Наличие минерально-сырьевого сырья стратегического значения (бокситы в Плесецком муниципальном округе, алмазы в Приморском муниципальном округе, редкие металлы (свинцовоцинковые серебряносодержащие руды) в городском округе «Новая Земля») определяют развитие в Архангельской области важных для страны алмазодобывающей и бокситодобывающей

промышленности, создание горнодобывающего производственного комплекса по добыче редкоземельных металлов на Новой Земле [12].

В двух внутрирегиональных центрах расселения: Архангельск - Северодвинск-Новодвинск и Котлас - Коржма базируются основные системообразующие предприятия Архангельской области, оказывающие значительное влияние на формирование ВВП области и обеспечивающие занятость населения.

Системообразующие предприятия обрабатывающей промышленности расположены в Плесецком и Онежском районах; в области деревообрабатывающей промышленности – в городе Онега и в Устьянском районе. Ведущие предприятия сельскохозяйственного профиля сосредоточены в Вельском, Устьянском и Холмогорском районах.



Рис. 4. Транспортно-планировочный каркас Архангельской области
 Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

Совокупность указанных факторов и условий привела к формированию своеобразной пространственной структуры экономики Архангельской области. Основная часть федеральных инвестиций сконцентрирована в северной части области и приходится на крупные города, в которых создаются объекты обрабатывающей и добывающей промышленности, объекты транспортной инфраструктуры. Создание таких предприятий мало влияет на развитие других населённых пунктов, особенно сельских. Наоборот, данная ситуация приводит к оттоку населения в крупные города, что соответствует росту количества населенных пунктов с малой людностью и не имеющих постоянного населения.

Особое место в пространственном планировании Архангельской области занимают проблемы лесного комплекса. В настоящее время крупные деревообрабатывающие и целлюлозно-бумажные предприятия, расположенные в г. Новодвинск, г. Коряжма, г. Онега, реализуют приоритетные инвестиционные проекты в области освоения лесов. В то же время в области, особенно в центральных и восточных районах, имеются обширные площади залесенных территорий и большое количество населенных пунктов, население которых формировалось на лесозаготовках и первичной деревообработке, а в настоящее время и стремительно сокращается. В целях сглаживания диспропорций, координации деятельности предприятий лесного комплекса и их кооперации в Архангельской области формируется территориальный инновационный лесопромышленный кластер, ключевая специализация которого лесоводство и деревообработка, целлюлозно-бумажное производство. Предусматривается упорядочение логистики и внедрение информационных технологий, сохранение существующей рабочей силы на действующих деревообрабатывающих предприятиях и создание новых рабочих мест в Пинежском, Плесецком, Виноградовском муниципальном районах. Активное развитие в лесопромышленном комплексе получает и сфера малого бизнеса (заготовка древесины, производство пиломатериалов, строганных изделий, мебели и др.), что особенно важно для сельских муниципальных образований.

К одной из приоритетных отраслей экономики в Архангельской области в настоящий период относится туризм. Привлекательность Архангельской области для развития туризма: выгодное географическое положение по отношению к развитым центральным районам страны, большое количество объектов туристского интереса, как

исторических, так и природных, красота северной природы, благоприятная экологическая обстановка. В качестве приоритетных видов туризма рассматривается культурно-познавательный, детский, экологический и арктический [13]. На основе анализа размещения объектов туристской инфраструктуры и перспективных планов по развитию определен перечень населенных пунктов, перспективная специализация которых будет связана с развитием туризма. В качестве потенциальных центров туризма, помимо г. Архангельска, на территории Архангельской области выделяются следующие точки притяжения туристов: г. Каргополь, пос. Пинега Пинежского района, г. Котлас и г. Сольвычегодск Котласского района, г. Вельск, дер. Вершинино Плесецкого района, село Красноборск.

На основе анализа современной территориально-отраслевой структуры, ресурсного потенциала муниципальных образований, приоритетных проектов и перспектив инвестиционного развития определены зоны и точки активизации хозяйственной деятельности на территории Архангельской области, на развитие которых должна быть направлена региональная политика по эффективному использованию пространственного фактора в усилении конкурентных позиций области (рис. 5).

Основные региональные зоны роста представлены агломерациями: Архангельской и Котласской, имеющей предпосылки для развития Плесецко – Мирненской. Характерной особенностью Архангельской агломерации является наличие двух центров: Архангельска и Северодвинска, городского округа Новодвинск и прилегающих сельских и городских поселений Приморского и Холмогорского района. На юге области формируется еще одна городская агломерация – Котласская, включающая городские округа Котлас, Коряжма и Котласский муниципальный район.

Также концепцией пространственного развития Архангельской области предлагается рассмотрение возможности формирования межмуниципальной Плесецко – Мирненской агломерации. Существенные преимущества данной агломерации связаны с чрезвычайно удобным центральным положением её территории в регионе. Влияние агломерации могло бы охватить всю срединную часть территории области, в которой нет других населенных пунктов, которые могли бы претендовать на роль такого межпоселенческого центра. Пгт Плесецк не обладает потенци-

алом по оказанию необходимого объема и качества социальных услуг, часть из которых реализуется в г. Мирный.

Вне зон влияния агломераций необходимо выделить организационно-хозяйственных цен-

тров и точек роста – опорных населенных пунктов регионального уровня: г. Вельск, с. Карпогоры и г. Онега. В качестве хозяйственных центров развития муниципального уровня выделены г. Каргополь, г. Мезень, г. Нямдома, пгт Коноша и п. Ерцево.

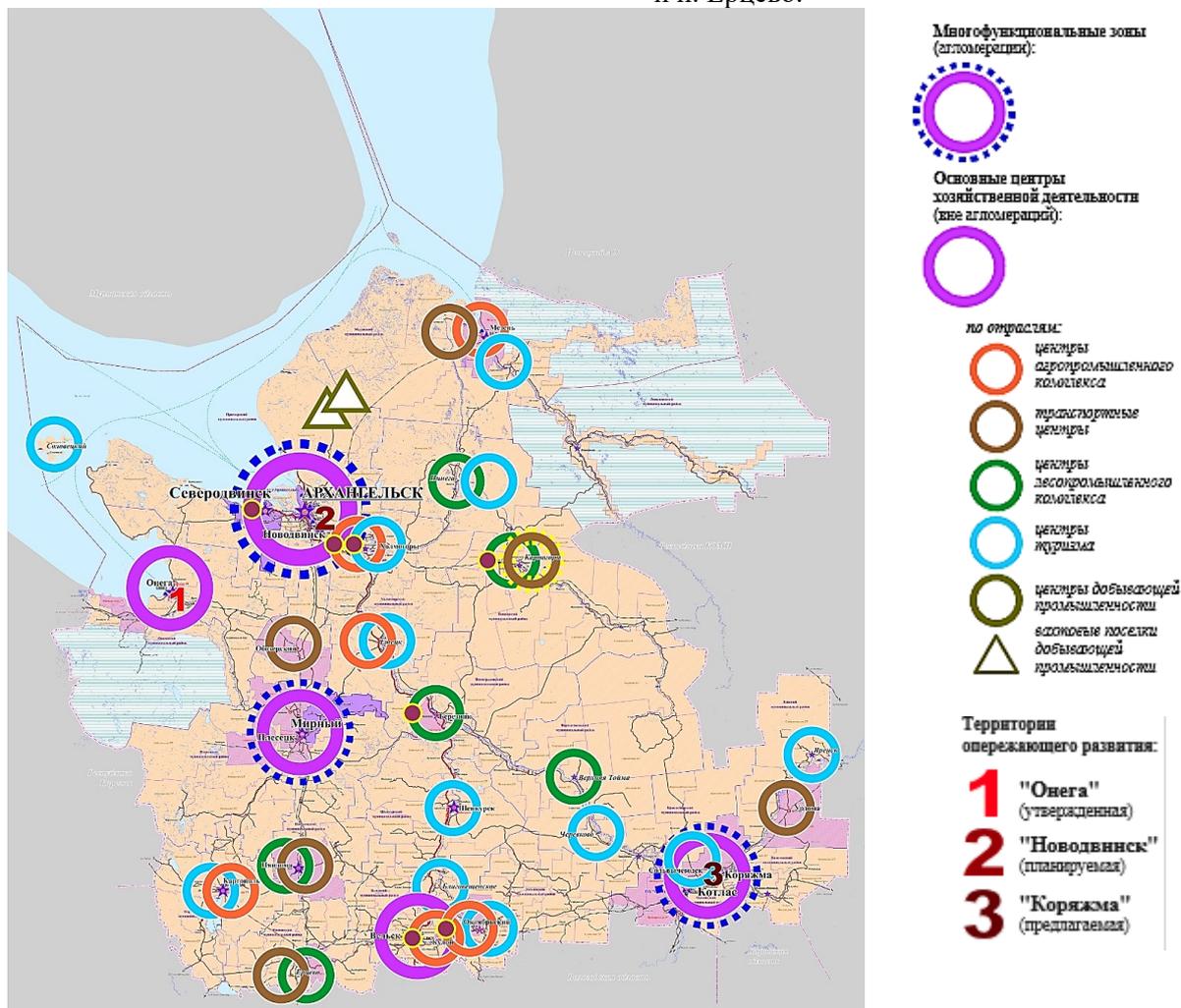


Рис. 5. Зоны и точки активизации хозяйственной деятельности

Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

К основным мероприятиям по развитию сельских территорий отнесено формирование опорных зон и выделение сельских населенных, являющихся базовыми для лесохозяйственных и агропромышленных предприятий, сельского туризма, что потребует развития транспортной, инженерной и социальной инфраструктуры.

Пространственное планирование регионального масштаба должно быть направлено на обеспечение экологической стабильности территории посредством формирования природно-экологического каркаса и сохранения его структурных элементов в условиях увеличения антропогенной нагрузки в зонах активизации экономической деятельности. Пространственная структура природно-

экологического каркаса представлена взаимосвязанной системой территорий с установленным или требующим установления природоохранным режимом и природных осей – экологических коридоров (рис. 6).

Особо охраняемые природные территории Архангельской области формируют основу природно-экологического каркаса, являясь его ключевыми звеньями. Особо охраняемые природные территории (ООПТ), имеющие федеральный статус, являются ключевыми ядра экологического каркаса как Север-Западного федерального округа, так и Архангельской области. Среди известных заповедных территорий региона, привлекательных для экологического туризма – государственный

природный заповедник «Пинежский», национальные парки «Кенозерский»; «Водлозерский», «Онежское Поморье» и «Русская Арктика», расположенный на архипелаге Земля Франца-Иосифа.

ООПТ регионального значения представлены 36 заказниками, 65 памятниками природы и одним природным парком, что свидетельствует о развитости сети особо охраняемых природных территорий Архангельской области, обладающей

разнообразным природным потенциалом, который может быть использован как в природоохранных, так и в туристических целях [14]. К наиболее ценным экосистемам в пределах области относятся малонарушенные лесные массивы, доля которых в Архангельской области является самой высокой по Северо-Западному региону и составляет около 30 % от площади лесного фонда.

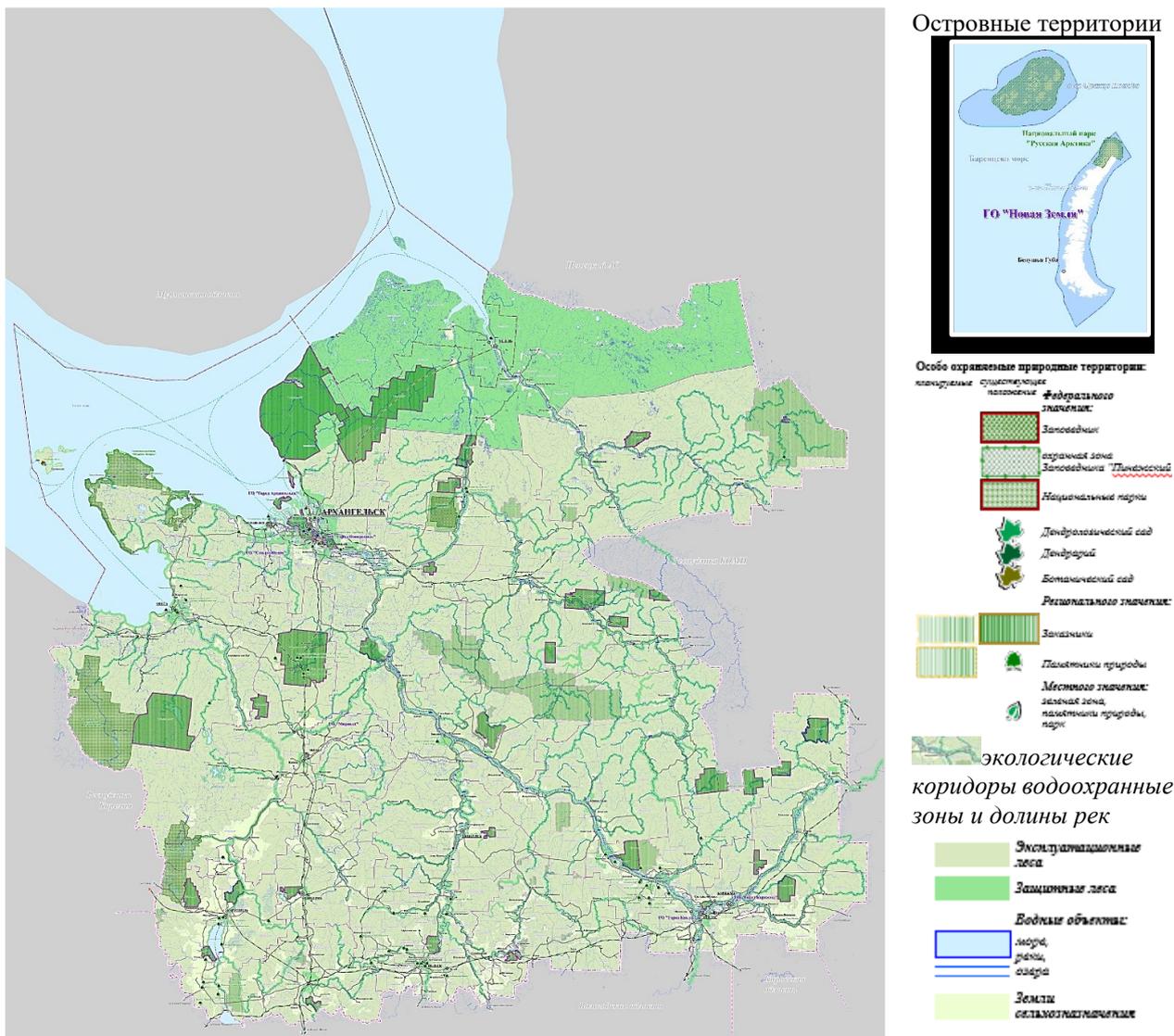


Рис. 6. Природно-экологический каркас Архангельской области

Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития Архангельской области в рамках Научно-исследовательской работы «Проект внесения изменений в Схему территориального планирования Архангельской области»

Природный экологический каркас региона тесно связан с историко-культурным каркасом, формирование которого можно отнести к «стратегическим направлениям использования культурного потенциала» [15].

Основой историко-культурного каркаса Архангельской области являются исторические оси расселения вдоль основных рек – Северная

Двина, Онега, Мезень, Пинега, Вага и их многочисленных притоков, где исторически сложилась сеть населенных мест, сохранивших до настоящего времени пространственно-планировочную организацию, отмечается наибольшая концентрация объектов культурного наследия, представленная ансамблями и памятниками истории и культуры, народными художественными промыслами и ремеслами. Основные узлы (или ядра)

историко-культурного каркаса представлены историческими городами: Каргополь (1380 г.) и Сольвычегодск (1492 г.) – федерального значения, Соловецким государственным историко-архитектурным и природным музеем-заповедником (входит в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО), Архангельским государственным музеем деревянного зодчества и народного искусства «Малые Корелы».

Также к элементам историко-культурного каркаса отнесены:

- Старинные сельские поселения. Они сохранили характерную северную и поморскую планировку деревень и сёл, храмы, часовни, обетные кресты, сакральные места, крестьянского дома и сельские усадьбы;

- Монастыри. (Соловецкий монастырь, Антониев Сийский и Крестный Онежский монастырь на Кий-острове и др.);

- Традиционные поселения, которые востребованы неорганизованными и организованными туристам. Среди них: д. Кимжа Мезенского района, дер. Ошевенское, дер. Лядины Каргопольского района, с. Веркола, с. Сура Пинежского района и другие.

Архангельская область является уникальной территорией сосредоточения памятников деревянной архитектуры (*первое место в Российской Федерации*,

<https://bereginja.mirtesen.ru/blog/43861639544/KULTURNO-ISTORICHESKOE-NASLEDIE-ARHANGELSKOGO-KRAYA>). Однако регион

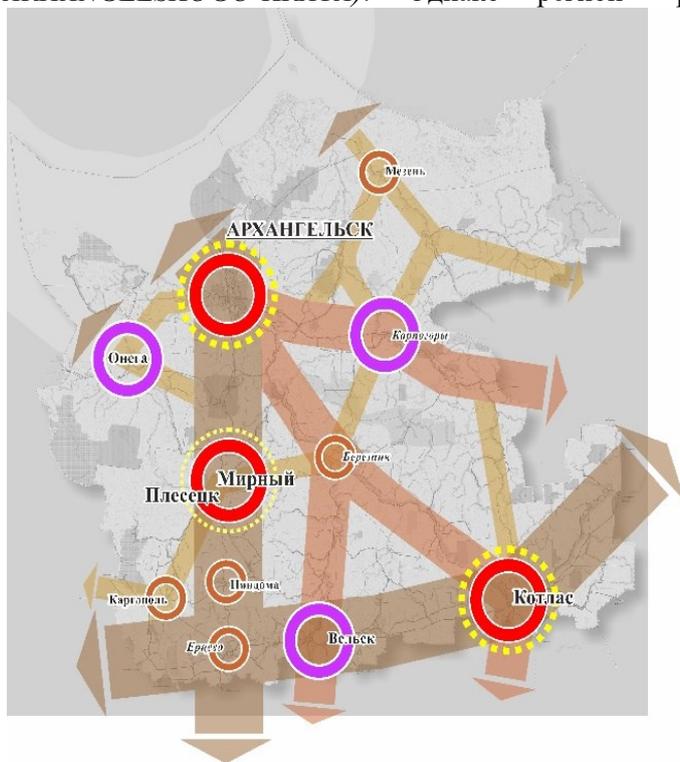


Рис. 7. Модель пространственной организации Архангельской области

Источник: Отчет о научно-исследовательской работе «Внесение изменений в схему территориального планирования Архангельской области». Том 2, книга 1. Санкт-Петербург, 2020

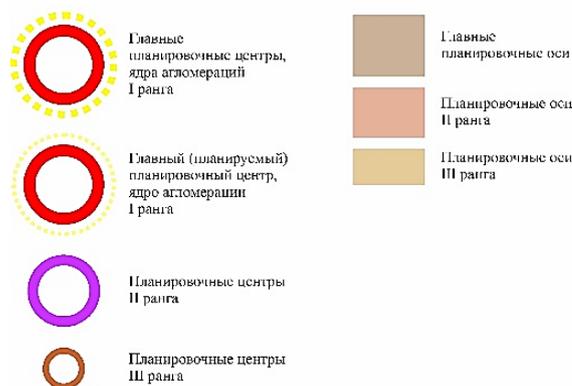
слабо использует свой уникальный историко-культурный потенциал вследствие недостаточного развития объектов туристской инфраструктуры и транспортных связей. Пространственное планирование предусматривает создание условий для развития туристской деятельности и формирования туристских центров для реализации инвестиционных проектов в сельских поселениях.

В качестве основного сценария социально-экономического развития Архангельской области, определяющего политику пространственного планирования, определен инновационный сценарий социально-экономического развития (*Областной закон Архангельской области от 18.02.2019 № 57-5-ОЗ URL: <https://www.garant.ru/hotlaw/arhangelsk/1261675/> (дата обращения 22.02.2025)*), направленный на максимальное использование ресурсного потенциала Архангельской области. Изменения в пространственной организации территории области базируются на анализе конкурентных преимуществ муниципальных образований и транспортной связности населенных пунктов, выделении опорных центров расселения внутрорегионального, межмуниципального и поселенческого (локального) уровней.

На рисунке 7 представлена модель пространственной организации территории Архангельской области. Планирование пространственного развития региона строится на основе системы отраслевых и пространственных приоритетов.

Планировочные центры:

Планировочные оси:



Модель пространственной организации Архангельской области отражает тенденции развития системы расселения и территориальной организации экономики. Главные региональные планировочные центры представлены городскими агломерациями, располагающимися на главных планировочных осях пространственного каркаса области. Относительно равномерное распределением точек роста, как планировочных узлов различного ранга, определено диверсифицированным развитием экономики с учетом специфики северных территорий. К приоритетным направлениям в области пространственного планирования отнесено развитие транспортно-планировочных осей регионального и межмуниципального уровня, определяющих устойчивое развитие опорных городских и сельских населенных пунктов Архангельской области.

Выводы.

Особенности пространственного развития Архангельской области определяются исторически сложившимися особенностями экономического освоения территории: очаговым размещением основных населенных пунктов и малой освоенностью огромной по площади, преимущественно залесенной территории.

Безусловным и важным обстоятельством развития Архангельской области является ее приморское положение, выступающее оплотом в развитии инфраструктуры освоения арктического сегмента России и усиления ее геостратегического положения.

Цели пространственного планирования Архангельской области — значительное повышение эффективности использования пространственного фактора в усилении конкурентных позиций региональной политики.

Основными конкурентными преимуществами Архангельской области являются: выгодное экономико-географическое положение, транспортно-логистический потенциал Архангельской области, как опорной зоны Арктики, значительные запасы лесных, водных ресурсов; наличие стратегических минерально-сырьевых ресурсов (алмазы, бокситы, редкие металлы); развитие городских агломераций, как центров расселения, уникальный историко-культурный и экологический потенциалы.

В условиях сложившейся планировочной организации Архангельской области необходимо использование методов системного последовательного регулирования развития территории, направленные на оптимизацию системы расселения и максимальное использование конкурентных преимуществ территории.

В качестве основных направлений пространственного планирования Архангельской области определены: развитие сети опорных центров расселения (опорных населенных пунктов), территориальной инженерно-транспортной инфраструктуры, создание и развитие территориальных производственных кластеров, развитие сельских населенных на базе производства сельскохозяйственной продукции и туризма, сохранение и развитие структурных элементов природно-экологического каркаса региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р об утверждении Стратегии пространственного развития России до 2030 г. с прогнозом до 2036 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/87971.html> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Чистобаев А.И., Федулова С.И. Пространственное планирование как инструмент региональной политики России // Россия: тенденции и перспективы развития - Ежегодник. Институт научной информации по общественным наукам РАН. 2017. № 12–2. С. 984-987.
3. Областной закон Архангельской области от 18.02.2019 № 57-5-ОЗ "Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Архангельской области до 2035 года". [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/hot-law/arhangelsk/1261675/> (дата обращения 22.02 2025)
4. Майборода В.А., Митягин С.Д., Спирин П.П. Правовые основы устойчивого развития (градостроительство). Санкт-Петербург: Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства, 2024. 236 с.
5. Мякиненков В.М. Экономические проблемы расселения и районной планировки на Севере // Стройиздат: Ленинградское отделение, 1983. 115 с.
6. Митягин С.Д., Спирин П.П. Природно-экономические основы градостроительства // Город и люди: пространство и время. Сборник статей Международной конференции, Смоленск, 28–30 апреля 2023 года. Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. С. 389–396.
7. Панов Л.К. Системы расселения и охрана природной среды на Севере // Проблемы Севера. М., 1973. Выпуск 18.
8. Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 № 296 (ред. от 05.03.2020) «О

сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/ (дата обращения: 25.02 2025).

9. Журавлёв П.С. Арктическая политика Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2012. № 6. С. 54–60.

10. Отчет о научно-исследовательской работе «Внесение изменений в схему территориального планирования Архангельской области». Том 2, книга 1. НИИ ПГ Санкт-Петербург, 2020.

11. Отчет о научно-исследовательской работе «Концепция пространственного развития территории Архангельской области» в составе НИР «Внесение изменений в схему территориального планирования Архангельской области», Санкт-Петербург, 2020. 289 с.

12. Отчет по выполнению части 3 НИР «Пространственная характеристика

Архангельской области» // Национальный исследовательский университет. Высшая школа экономики. Санкт-Петербург, 2018. 187 с

13. Закон Архангельской области от 24 марта 2014 г. № 99-6-ОЗ "О туризме и туристской деятельности в Архангельской области" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL:

<https://base.garant.ru/25110112/?ysclid=m9chemwqxl219164122> (дата обращения 25.02 2025).

14. Постановление Правительства Архангельской области от 7 августа 2018 года № 358-пп Об утверждении Концепции развития системы особо охраняемых природных территорий регионального значения Архангельской области и плана ее реализации на период до 2028 года (с изменениями на 19 марта 2024 года).

15. Шульгин П.М. Концепция культурного ландшафта и практика охраны этнографического наследия (на примере территорий российского Севера) // Мир России. 2007. № 3. С. 147–166.

Информация об авторах

Спирин Павел Павлович, кандидат географических наук, академик РААСН, директор ООО «НИИ ПГ». E-mail: pavelsp@list.ru. Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства. Россия, 191186, Санкт-Петербург, ул. Итальянская, 4. Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Россия, 119331, Москва, просп. Вернадского, 29; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Поступила 11.04.2025 г.

© Спирин П.П., 2025

Spirin P.P.

*Scientific Research Institute Perspective Urban Planning
The Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal
Services of Russia. Russia
St. Petersburg Polytechnic University official website
E-mail: pavelsp@list.ru

SPATIAL PLANNING. REGIONAL APPROACH (USING THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION)

Abstract. *The object of the study is the territory of the Arkhangelsk region, the spatial development of which is determined by its location in the northern latitudes and the coastal position providing access to the Arctic seas. The Arkhangelsk region is characterized by uneven distribution of urbanized territories, significant imbalances in the socio-economic development of municipalities. The choice of the optimal model of the territorial organization of the region, as the purpose of the study, is aimed at ensuring sustainable and balanced spatial development, reducing inter-municipal differences in the level and quality of life of people, providing conditions for the innovative development of the region's economy and attracting investments. The author considers the optimization of the settlement system (including rural settlement) and the formation of zones and points of economic activity aimed at strengthening the competitive position of regional policy to be the main tasks of the spatial development of the Arkhangelsk region. The main regional planning centers are represented by urban agglomerations (Arkhangelsk and Kotlas), forming two intraregional settlement systems. Based on the conducted research, a model of the spatial organization of the Arkhangelsk region has been developed. The priority areas of spatial planning of the region include the development of transport and*

planning axes at the regional and inter-municipal levels, which determine the sustainable development of the main urban and rural settlements of the Arkhangelsk region. The research methodology is based on the use of a systematic approach in the analysis of the processes of urban development of the territory of the subject of the Russian Federation. In studying the development of spatial systems and the interaction of their structural components, such methods of system analysis as analytical, logical, graphical and modeling are used. The use of a systematic scientific and methodological approach made it possible to identify the general patterns of spatial development of the region as an integral object, as well as its specific systems. Main scientific results: the role of using frame models in planning the spatial development of the region is substantiated. The framework of settlement, transport planning, ecological and historical-cultural framework of the territory of the Arkhangelsk region are considered and a system of measures for optimizing the structure of settlement and the formation of supporting settlements is proposed.

Keywords: spatial planning, Arkhangelsk region, intraregional specifics, planning organization, settlement framework, supporting settlements, agglomeration.

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2024 No. 4146-r on approval of the Spatial Development Strategy of Russia until 2030 with a forecast up to 2036 [Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 28 dekabrya 2024 g. No 4146-r ob utverzhdenii Strategii prostranstvennogo razvitiya Rossii do 2030 g. s prognozom do 2036 g.]. URL: <https://www.consultant.ru.law.hotdocs.87971.html> (date of access: 20.02 2025). (rus)
2. Chistobaev A.I., Fedulova S.I. Spatial planning as a tool of Russia's regional policy. Russia: trends and development prospects [Prostranstvennoe planirovanie kak instrument regional'noj politiki Rossii]. Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya-Ezhegodnik. Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences. 2017. No. 12-2. Pp. 984–987 (rus)
3. Arkhangelsk Region Regional Law No. 57-5-OZ dated 02.18.2019 "On Approval of the Strategy for Socio-Economic Development of the Arkhangelsk Region until 2035" [Oblastnoj zakon Arhangel'skoj oblasti ot 18.02.2019 No 57-5-OZ "Ob utverzhdenii Strategii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Arhangel'skoj oblasti do 2035 goda"]. URL: <https://www.garant.ru.hotlaw.arhangel'sk.1261675>. (date of access: 22.02 2025). (rus)
4. Majboroda V.A., Mityagin S.D., Spirin P.P. Legal foundations of sustainable development (urban planning) [Pravovye osnovy ustojchivogo razvitiya (gradostroitel'stvo)]. Saint Petersburg: Scientific Research Institute of Advanced Urban Planning, 2024. 236 p.(rus)
5. Myakinenkov V.M. Economic problems of settlement and district planning in the North. [Ekonomicheskie problemy rasseleniya i rajonnoj planirovki na Severe]. Stroyizdat: Leningrad branch, 1983. 115 p. (rus)
6. Mityagin S.D., Spirin P.P. Natural and economic foundations of urban planning. [Prirodno-ekonomicheskie osnovy gradostroitel'stva]. City and people: space and time. Collection of articles of the International Conference, Smolensk, April 28-30, 2023. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2023. Pp. 389–396. (rus)
7. Panov L.K. Settlement systems and environmental protection in the North. [Sistemy rasseleniya i ohrana prirodnoj sredy na Severe]. Problems of the North. M 1973, Issue 18 (rus)
8. Decree of the President of the Russian Federation dated 05.02.2014 No 296 (as amended on 03/05/2020) "On the land Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation" [Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 02.05.2014 No 296 (red. ot 05.03.2020) «O suhoputnyh territoriyah Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii»]. URL: https://www.consultant.ru.document.cons_doc_LAW_162553 (date of access: 25.02 2025). (rus)
9. ZHuravlyov P.S. Arctic policy of the Arkhangelsk region. [Arkticheskaya politika Arhangel'skoj oblasti]. Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Humanities and Social Sciences. 2012. No. 6. Pp. 54–60 (rus)
10. Report on the research work "Making changes to the territorial planning scheme of the Arkhangelsk region". Volume 2, book 1. Scientific Research Institute of St. Petersburg, 2020. [Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Vnesenie izmenenij v skhemu territorial'nogo planirovaniya Arhangel'skoj oblasti». Volume 2, book 1. Scientific Research Institute of St. Petersburg, 2020. (rus)
11. Report on the research work "The concept of spatial development of the territory of the Arkhangelsk region" as part of the research project "Amendments to the territorial planning scheme of the Arkhangelsk region",. [Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Konceptiya prostranstvennogo razvitiya territorii Arhangel'skoj oblasti» v sostave NIR «Vnesenie izmenenij v skhemu territorial'nogo planirovaniya Arhangel'skoj oblasti». St. Petersburg, 2020. Scientific Research Institute PG - 289 p. (rus)
12. Report on the implementation of part 3 of the research "Spatial characteristics of the Arkhangelsk region". [Otchet po vypolneniyu chasti 3 NIR «Prostranstvennaya harakteristika Arhangel'skoj oblasti»].

National Research University. Higher School of Economics. Saint Petersburg, 2018. 187 p. (rus)

13. Arkhangel'sk Region Law No. 99-6-OZ dated March 24, 2014 "On Tourism and Tourism Activities in the Arkhangel'sk Region" (with amendments and additions) [Zakon Arhangel'skoj oblasti ot 24 marta 2014 g. No 99-6-OZ "O turizme i turistskoj deyatelnosti v Arhangel'skoj oblasti" (s izmeneniyami i dopolneniyami)]. URL: <https://base.garant.ru/25110112/?ysclid=m9chemwqx1219164122> (date of access: 25.02 2025). (rus)

14. Resolution of the Government of the Arkhangel'sk Region dated August 7, 2018 No. 358-pp On Approval of the Concept for the Development of a System of Specially Protected Natural Territories of Regional Significance in the Arkhangel'sk Region

and its Implementation Plan for the period up to 2028 (as amended on March 19, 2024) [Postanovlenie Pravitel'stva Arhangel'skoj oblasti ot 7 avgusta 2018 goda No 358-pp Ob utverzhdenii Konceptii razvitiya sistemy osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij regional'nogo znacheniya Arhangel'skoj oblasti i plana ee realizacii na period do 2028 goda (s izmeneniyami na 19 marta 2024 goda)]. (rus)

15. SHul'gin P.M. The concept of a cultural landscape and the practice of protecting ethnographic heritage (on the example of the territories of the Russian North). [Konceptiya kul'turnogo landshafta i praktika ohrany etnograficheskogo naslediya (na primere territorij rossijskogo Severa)]. Mir Rossii. 2007. No. 3. Pp. 147–166. (rus)

Information about the authors

Spirin, Pavel P. Candidate of Sciences in Geography, Academician of RAACS, director NII PG. E-mail: pavelsp@list.ru. Russia., 191186, St. Petersburg, Italianskaya St., 4; The Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of Russia. 29 Vernadskogo avenue, Moscow, 119331, Russia; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Politechnicheskaya str., 29.

Received 11.04.2025

Для цитирования:

Спирин П.П. Пространственное планирование. Региональный подход (на примере Архангельской области) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 54–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-54-68

For citation:

Spirin P.P. Spatial planning. Regional approach (using the example of the Arkhangel'sk region). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 54–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-54-68

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-69-82

Вовженяк П.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: polina.vov@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СИМВОЛИКИ, МОРФОЛОГИИ И ФЕНОМЕНОЛОГИИ АРХИТЕКТУРЫ ПЕЩЕРНЫХ МОНАСТЫРЕЙ ПРИДОНЬЯ И ПРИОСКОЛЬЯ

Аннотация. В данной статье рассматривается архитектурный аспект создания и использования пещерных пространств Придонья и Приосколья. Использование пещер в качестве культовых мест, предназначенных для проведения обрядов богослужения рассмотрено на примерах пещерных монастырей Воронежской и Белгородской областей, образованных в меловых отложениях на данной территории. Актуальность данной темы обусловлена угрозой утраты пещерных памятников XIII-XIX веков под влиянием временных, природных и антропогенных факторов. Основными задачами являются выявление символического смысла создания и существования пещерных обителей, выявление приемов морфологического описания и феноменологии формообразования пещерного зодчества в данном регионе. Методика исследования базируется на принципах феноменологических исследований, ее основой являются материалы экспертных оценок сохранности подземных монастырских комплексов, натурное обследование, обмерные чертежи, рисунки, фотофиксация отдельных объектов. В статье рассмотрен процесс пещерокопания с точки зрения символики; выявлены принципы аскетического мировоззрения, на которых основаны архитектурные особенности формы подземных пространств; изучены средства и способы морфологического описания внутреннего пространства пещер, приведены их примеры; описано фрагментарное восприятие пещерных пространств человеком, пространственная структура пещерного монастыря, момент ее формообразования. Символика, морфология и феноменология пещерных монастырей Придонья и Приосколья позволяют систематизировать концепции их архитектурных форм. Приоритет в подходе к восстановлению и адаптации к современным условиям жизни должен быть ориентирован прежде всего на сохранение аутентичности.

Ключевые слова: пещерокопательство, символика, морфология, феноменология, пещерные монастыри, архитектура, подземное пространство, формообразование.

Введение. Пещерные храмы и монастыри Придонья и Приосколья в современном мире являются объектами историко-культурного наследия, так как пещерокопательство уже не практикуется. В связи с этим открыт вопрос о сохранении этих памятников, угроза утраты которых растет под влиянием процессов временного, природного и антропогенного характера на территориях их расположения. Пещерные монастыри можно рассматривать как символы стойкости православной веры, ведь в меловых стенах увековечены сила, труд, смирение и желание воссоединения души человека с Богом как суть аскетического мировоззрения. На сегодняшний день растет количество туристов и паломников, желающих посетить сакральные пещерные обители, предназначенные для уединения и проведения тайных обрядов богослужения, что также имеет определенное влияние на их сохранность. Необходим правильный подход к разработке стратегии адаптации таких уникальных объектов к современным условиям жизни, который может быть получен путем исследования особенностей их символики, морфологии и феноменологии.

Изначально историю пещерных обителей описывали их настоятели. Первые публикации о пещерах Придонья делает Самуэль Готлиб Гмелин, в трудах 1769 года опубликован обзор Дивногорских пещер. Сам процесс пещеростроительства одним из первых описал А. Хреновский. Описанием археологических исследований в дореволюционный период занимались Никольский П.В., Введенский С. Н., Олейников Т. М., Савелов Л. М., Гайдуков Н. Е., Вейнберг Л. Б., Спицын А. А., Правдин А. М., Гусев Н. Краевед Струков Д. М. сделал альбом натуральных зарисовок пещерных памятников Дона и Оскола. Феноменологию пещерных монастырей раскрывали в своих трудах Кременецкий А., Самбикин Д. И., Набивач И. В., Никонов Ф., Васильев П. Пространственные характеристики пещерных пространств приводит А. Г. Габричевский [1], при этом часто цитируя труды Гегеля, формулировавшего феномен пещерного зодчества как «отрицательное зодчество», «негативную архитектуру». Архитектурные особенности В 90-х гг. XX в. описывают В. И. Пулужников [2] и А.О. Амелькин [3]. В начале XXI века датировку возникновения и периодизацию формирования и

развития пещерных комплексов Придонья рассматривают историки В. В. Степкин [4], И. А. Агапов [5], Ю. В. Полева [6], А. П. Гунько [7], Ю. А. Долотов [7], С. К. Кондратьева [7]. В трудах Юрия Юрьевича Шевченко в начале XXI века рассмотрены типы христианских подземных сооружений этого региона [8].

В исследовании соотносятся различные стороны и компоненты феномена пещерокопательства в меловых горах устьев рек Дон и Оскол с целью установления его инвариантной смысловой структуры. Целью исследования является выявление особенностей архитектуры пещерных памятников Придонья и Приосколья с позиции символики, морфологии и феноменологии, что даст возможность сформировать более полное и объемное представление о пещерном зодчестве рассматриваемого региона.

Задачи исследования:

1) Проанализировать способы пещерокопательства, выявить суть формообразования пещерного пространства.

2) Установить позицию аскетической идеологии, давшей мотив основания для создания пещерных обителей в Придонье и Приосколье. На ее основе выявить символическое значение архитектурных особенностей пещерного пространства и его деталей.

3) Рассмотреть возможности и приемы морфологического описания пещерных монастырей, определяющие архитектурные особенности их внутреннего пространства.

4) На основе рассмотрения феноменологии пещерных монастырей Придонья и Приосколья выявить суть формообразования пещерного зодчества.

Объект исследования – пещерные монастыри культового назначения. Предмет исследования – архитектурные особенности внутреннего пространства пещерных монастырских комплексов.

Методика исследования базируется на принципах феноменологических исследований:

– описываются только исследованные пещерные монастыри, а также факты их возникновения и развития;

– мнения исследователей описываются без предпочтений, нейтрализуется, рассматривается рамках реальности;

– исследование имеет направленность на предмет принадлежности пещерных монастырей Придонья и Приосколья к архитектурным объектам.

Методы исследования базируется на комплексном анализе объектов культового пещерного зодчества, анализе исторических,

краеведческих, искусствоведческих, богословских публикаций. Основой методики исследования являются материалы экспертных оценок сохранности подземных монастырских комплексов, натурное обследование, обмерные чертежи, рисунки, фотофиксация отдельных объектов.

Основная часть. Понятие, которым можно охарактеризовать возникновение пещерного храма, изошедшее от людей, черпающих знания и навыки созидания, изучая устройство мира и природы – «архитектура без архитектора». Современным специалистам многому стоит поучиться у архитектуры до того времени, как она стала деятельностью узконаправленных специалистов. Вместо того, чтобы сражаться с природой, безымянные строители прошлого принимали её капризы и особенности локации и адаптировали под них свои сооружения, реализуя в объектах строительства свои религиозные идеи. Многие решения, считавшиеся примитивными, на самом деле предвосхищали наши громоздкие технологии. Создание пещерного монастыря пошло естественным путем – не обуздано природу, а вошло с ней в синтез. Человек оставил стихии главенствующую роль, приспособился к формам естественного происхождения. Вошел в них, при этом, не привнося изменения среды, а лишь создав в ней для себя зону жизнедеятельности.

В основание аскетики и православной антропологической традиции легли нравственно-аскетические наставления и идеи праведной христианской жизни Антония Великого, местом отшельничества которого стала Святыя Гора Афон. Подобно Антонию Великому, монахи оставляли земную жизнь, уходили под землю и, условно обрекая себя на символическую смерть, умерщвляли свою плоть и заживо хоронили себя от внешнего мира в ими же вырытых «могилах» – кельях. Ушедших из жизни монахов затворников часто хоронили в тех же кельях, где они и провели последние свои дни. Бывали случаи, когда отшельники, чувствуя приближение смерти, сами замуровывали вход в свою келью и оставались в ней на вечно [9]. Поэтому сегодня многие пещерные монастыри и кельи несут функцию и подземных некрополей. С пещеры, самостоятельно выкопанной или обнаруженной и обжитой подвижником, к которому затем присоединялись другие люди, ищущие молитвенного уединения, зарождались многие русские монастыри.

Подавляющее большинство культовых пещер средневропейской части России расположено к лесостепному Подонью. Распространению пещерокопательства в

Придонье и Приосколье способствовал фактор фронтирования территорий, которые стали зоной культурного соприкосновения и взаимодействия русской и украинской традиции [8]. Именно на стыке двух культур народ проявил свою волю и привнес в православную культуру новое направление – пещерокопание. В России данные территории, включая Поволжье, имеют самое большое его распространение. С начала XVII века православные отшельники и монахи создавали здесь подземные обители, а также занимали, расширяли старые уже вырытые, датировка их происхождения предположительно приниматься не позднее VIII в. Не смотря на небольшие территории количество паломников отсюда на Гору Афон с 1801 по 2012 г. не уступало Москве [10]. Кто-то из крестьян Среднерусского Белогорья уходил для пострига на Гору Афон, а кто-то в рамках народного православия создавал сакральные локусы на Белых Горах родной земли. При этом между собой они поддерживали тесные духовные связи, не приветствуемые, как показывают архивные документы, официальными властями.

Возникновение пещерных монастырей не связано с деятельностью специалистов сфер архитектуры и строительства, никогда не создавался «проект пещер», не разрабатывались конструктивные и технические решения. Создатели были простыми людьми, мотивированными религиозной верой и вместо теоретических знаний могли пользоваться лишь творческой интуицией и внутренним опытом. Чтобы описать феномен появления пещер «достаточно было бы изучить архитектуру любого византийского храма или же технику каменной кладки, чтобы уловить то уважение к внутренней жизни материала, которое испытывает строитель, избегающий какого бы то ни было насилия над камнем, каких бы то ни было попыток подчинить материал произволу собственных замыслов.» [11] Процесс пещерокопания был основан на особом диалоге мастера и природного материала, при этом мастер, отказавшись от тщеславия, проявив самоотречение, позволил самому материалу выразить свою суть, что невозможно было бы осуществить, используя современную строительную технику. В данном случае основу положила взаимосвязь архитектуры и природы, которая исторически обусловлена и развивается вместе с обществом.

Процесс пещерокопания был при этом построен следующим образом:

- обычно пещеру начинал строить один человек, затем к нему присоединялись

единомышленники, отмечены даже случаи найма рабочих;

– работы велись при слабом свете свечей и ламп, из-за дезориентации во времени рабочий процесс часто продолжался и даже усиливался в ночное время, тогда же к строителям присоединялся окрестный народ, закончивший свои дневные хлопоты;

– основная часть рабочих трудились в полном молчании, при этом слушая чтение акафистов и канонов своими товарищами;

– распределение рабочих было организовано поочередно один за другим, всего участвовало 30 человек;

– одни трудятся заступом, другие в решетках и корзинах передают набранную землю следующим и т. д., пока не достигнут выходной двери.

Отделка могла включать выравнивание, шлифовку и иногда орнаментацию стен. Иногда использовалась краска и штукатурка.

Разработка сохранялась без обвалов длительное время, поскольку это позволяла плотность и увлажненность меловой породы, а точнее мергеля, который при увлажнении частично кристаллизуется и становится крепким. Пещерные лабиринты часто прокладывались вдоль естественных тектонических трещин. Иногда для укрепления использовались дерево или кирпич. Кирпич применялся для закладки крупных трещин и полостей в породе, также укреплялись своды. При строительстве использовался обожженный красный и меловой (выпиленный из мела) кирпич. Судя по следам и углублениям в стенах, дерево применяли для устройства дверных проемов, полок и лежанок, которые, как и все органические детали, не сохранились [7].

Символика архитектурных форм пещерных монастырей. В пещерном отшельничестве внимание акцентируется в духовном развитии и его этапах. Духовная эволюция достигается постоянной внутренней борьбой со своими грехами и пороками. Таким образом, в основу русской православно-аскетической традиции легли законы христианской этики, нравственности и система общественных отношений, основанная благочестными древневосточными подвижниками, расширявшими границы своей веры. Суть христианского подвижничества кроется в усердном стремлении единения души с Богом, в совершенствовании духовно-нравственных качеств, которое осуществляется через добродетель [12]. Главный принцип христианского аскетизма заключается в синергизме, т.е. сотрудничестве и

согласованности двух волей: Божественной и человеческой. Спасение и исцеление человеческого естества возможно только снисхождением Божественной благодати. Исключительно через нее человеческие душевные и телесные подвиги обретают истинный смысл. Все монашеские подвиги – пост, труд, бдение, уединение, удаление от мира, хранение чувств, чтение Священного Писания и др. сами по себе являются лишь упражнениями, если через них не пройдет Божественная благодать. Совокупность подвигов определяется как трудничество. В основе христианской аскетики лежат обеты послушания, нестяжания (независимости человека от привязанности к материальным благам) и целомудрия. Аскетика всегда имеет своей целью восстановить единство духа человеческого с духом Божьей благодати и гармонизовать внешнюю и внутреннюю жизнь человека, христианина.

"Затвори двери твоей кельи, сядь в углу и отвлеки мысль твою от всего земного, телесного и скоропреходящего. Потом склони подбородок на грудь свою и устрями чувственное и душевное око на пупок свой: далее сожми обе ноздри свои так, чтобы едва можно было дышать, и отыщи глазами приблизительно то место сердца, где сосредоточены все способности души. Сначала ты ничего не увидишь сквозь тело твое; но когда проведешь в таком положении день и ночь, тогда, о чудо, увидишь то, чего никогда не видал, увидишь весьма ясно, что вокруг сердца твоего распространяется божественный свет" - Прохоров Г. М. [13].

Основой аскетической деятельности является внутренняя духовная сторона жизни, общественная деятельность основывается на внешних проявлениях. Для аскетов важна душа, для общественников - тело. Если главную роль в общественной деятельности играет материальная ценность, то цель аскетики – нравственное становление человека. Возникает вопрос о том, какая из этих ценностей важнее, ведь такой выбор часто остро встает перед людьми. В православии ответ определен в пользу конечно же духовности, материальная сторона жизни несет подчиненную роль. Если бы отрицать аскетизм за возделывание им духовной стороны жизни человечества, то такому же суду тогда следовало бы предать и философию. Ведь и она больше всего занимается истолкованием высших основ и целей бытия.

Назначением храма как архитектурного объекта является проведение в нем собрания христиан, совершения общих богослужений и религиозных обрядов. Храм своим внешним видом должен олицетворять величие Бога и

красоту Царствия Небесного. Русское храмовое зодчество характеризуется работой по эталону, которыми служат образцовые сооружения, принятые Церковью как канонический идеал, соответствующие догматическим правилам церковного учения. Архитектурные формы храмостроительства являются символами определенной мифологической интерпретации. Например, купол храма символизирует небо, алтарь - святая святых, атриум является символом отцовской власти, цвет – почитание определенных святых [14] и т.п. Композиция храма и его художественный образ отражает символический смысл его существования, который основан на православной догматике. По таким принципам сложен архитектурный замысел православного монастыря. Монастырь представляет собой замкнутое композиционно завершенное небольшое пространство, образовавшее культурно-религиозный духовный центр общественного использования на местной территории.

Храмы всегда были украшены самыми прекрасными и совершенными произведениями искусства, соответствующими своей исторической эпохе. Из слов священного писания, христианский храм представляет миру образ Царствия Небесного, которое ожидает нас в предстоящей вечной жизни, существуя с начала времен [15]. Этот образ передается через символический смысл архитектурной формы храма, через его композицию и пропорции, которые подчеркиваются богатым убранством и искусством. Так же храм служит новообращенным христианам училищем духовной мудрости, выражающейся через образы архитектуры, скульптуры, иконописи, церковного пения и т.п.

Общественные проповеди даже сам Христос проводил в ветхозаветном иерусалимском храме, но для личной молитвы он удалялся в уединенные места, в том числе и используя для этого пещеры. В христианском учении говорится, что сам человек является в определенном смысле храмом Божиим, а украшением его служит добродетель. Благолепие, материализовавшееся через виды церковного искусства, представляет собой Божие величие и красоту Его Царства [15]. Конечно же внешняя красота и великолепие соответствуют положенному статусу и величии храма, но гораздо более глубокое – «истинное» чувство благодатного воздействия мы ощущаем от храмов, облик которых построен на благородной простоте гармонично построенных пропорций архитектурных форм с использованием неброского спокойного декора. В пример можно привести Владимирский храм

«Покрова на Нерли», Новгородский храм «Спаса Преображения на Нередице», «Успения на городке» в г. Звенигороде.

Пещерный монастырь, его основные архитектурно-композиционные приемы и организация монастырского строительства в целом соответствуют каноническим требованиям Русской Православной Церкви, традициям русского иночества и религиозно-догматическим канонам [16]. Но следуя идеям и мотивации создания, пещерный монастырь уже не есть «рукотворный мир», он своим устройством, в целом, символизирует образ царства небесного - Храма Божьего, что позволяет допускать исключения в применении православных канонических традиций в устройстве пещерного храма. Общая идея – объединяет все части подземного сооружения в одно символическое целое. Например, есть исключения в устройстве кругового коридора вокруг пещерного храма для проведения «Крестного хода» в праздничные дни; в делении пространства храма на алтарь, сам храм и притвор; в форме помещения и свода, ориентации входа четко на восток и т. д. Соответственно, архитектурный образ пещерного храма отличается от храма наземного. Символика роскошной отделки, деталей, структурного разделения на части, цвета в пещерном культовом зодчестве заменяется на сравнение пещерного монастыря с неразделимым и истинным царством Божиим, которое не нуждается в украшении своей природной формы.

Непосредственное символическое значение архитектурных форм пещерных храмов и монастырей обусловлено принципами аскетической идеологии, давшей мотив для их создания:

- скромность, простота внешнего облика;
- отказ от материальных благ;
- уединение, удаление от мира, замкнутость;
- символизм;
- функциональность.

Изначальная функция пещерного храма создавать условия для уединения, проведения сакральных церемоний и обрядов. Скромные размеры, аморфные формы и отсутствие декора характеризуют пещерный монастырь как место хриstopодражательского подвига, аскетического подземного жилья и особой формой погребения. Пещеры являются местом проведения уединенной молитвы и сакральных церемоний и обрядов. В психологии восприятия архитектурной формы и внутреннего пространства пещерного монастыря передается

особый сакральный смысл внутреннего мира человека и его единения с Богом.

Морфологические особенности. Под морфологическим описанием архитектурной формы пещерного монастыря подразумевается такой вид описания, который фиксирует конфигурацию и параметры внутреннего пространства пещер и их архитектурных деталей. Рисунки и чертежи, фиксирующие планы, сечения полостей, размеры и пропорции, которыми обладает подземное пространство являются средствами их морфологического описания. Характерными примерами морфологического описания пещерных монастырей являются обмерные чертежи, рисунки планов, чертежи сечений ходов-галерей, топографические планы территории расположения, фотографии пещерных пространств и их деталей. Установление последовательности и характера распределения пространственных частей и архитектурных масс, а также времени их восприятия, будит выделяться как особый тип морфологических описаний пещерных монастырей [17].

В соответствии с морфологическим описанием могут быть сформированы морфологические модели пространственно-планировочной структуры пещерных монастырей. Они представляют собой аксонометрический либо перспективный чертеж, на котором обозначена планировка, форма сечений структурных элементов, а также их положение в пространстве (угол уклона по отношению к горизонтальной плоскости). Примером таких морфологических моделей является аксонометрическая схема пещерного монастыря в с. Холки Белгородской области, В 1985 г. в статье В.И. Плужникова, посвященной пещерам на территориях монастырей на Дону и Осколе [2]. Схема дополнена рисунком, изображающим внутреннее пространство пещерного храма (рис. 1).

Данная схема была составлена по архитектурным описаниям элементов пещерного комплекса, рисункам и замера, и не имеет высокой степени точности. В статье А.А. Гуныко, С.К. Кондратьева, А.П. Гуныко «Пещеры у села Холки» [7] представлены схемы планов Холковских пещер, с указанием масштабной линейки и ориентации по сторонам света (рис.2). Алтарь пещерного храма ориентирован на восток, что соответствует каноническим требованиям храмостроительства. Если учесть трудность ориентации под землей и отсутствие в те времена специальных приборов для измерения сторон света, точность определения правильного направления сложно объяснить.

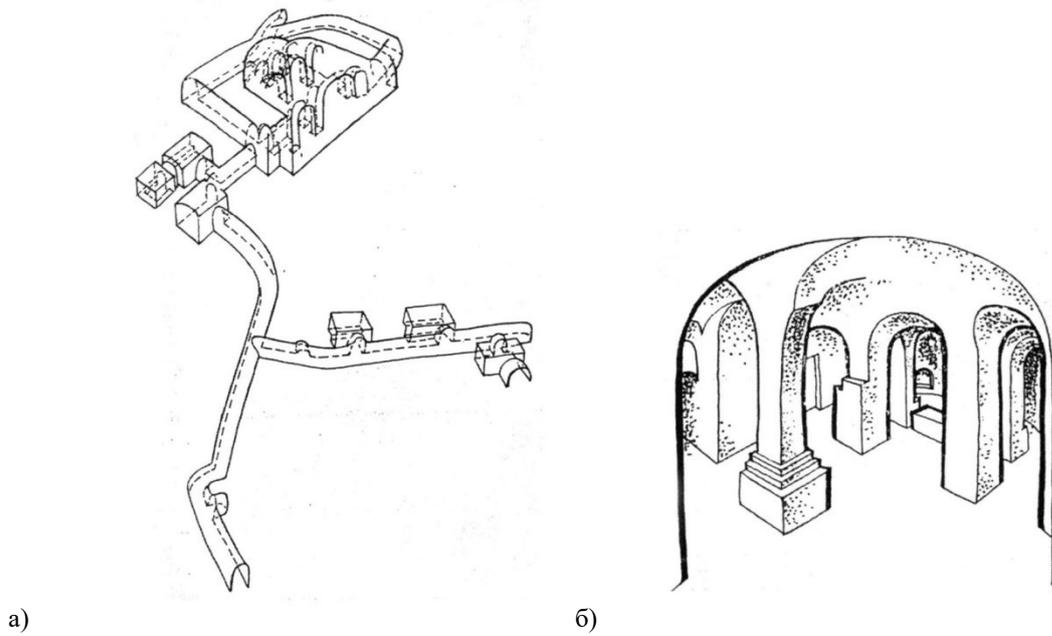


Рис. 1. а – аксонометрическая схема пещерного монастыря в селе Холки; б – рисунок пещерного Храма (Плужников, 1985)

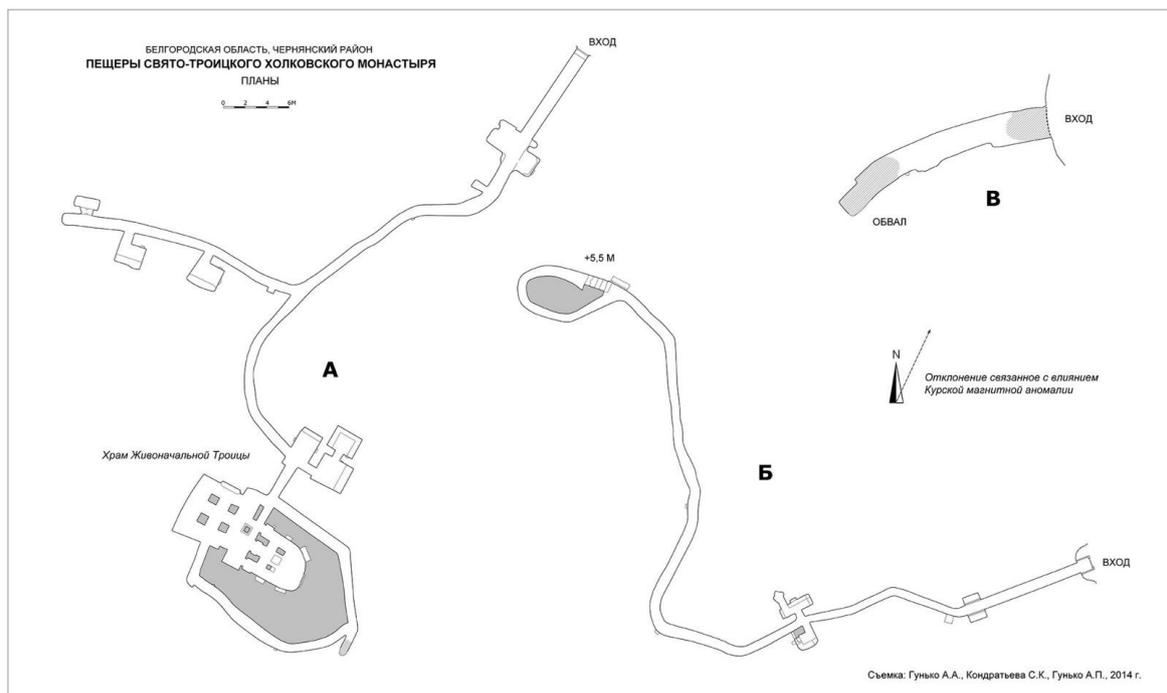


Рис. 2. Схема плана пещерного монастыря в с. Холки Белгородской области (А.А. Гунько, С.К. Кондратьева, А.П. Гунько, 2014)

Также существуют схемы планов пещер, расположенных на территориях Успенского Дивногорского монастыря, Шатрищегорского Спасо-Преображенского монастыря, Костомаровского Спасского монастыря, Воскресенского Белогорского монастыря, Успенского Николаевского монастыря и др. монастырей Белгородской, Воронежской,

Курской и Липецкой областей. Использовать такие схемы можно для фиксации исторического облика пещерного монастыря как памятника архитектуры в связи с тем, что на сегодняшний день существует угроза разрушения некоторых из них. Многие пещеры еще не исследованы находятся в неудовлетворительном состоянии и без вмешательства со временем могут быть

утрачены что принесет большой ущерб культурному наследию России [18]. Для начала восстановительных и реставрационных работ морфологические описания нужны при расчете пространственных свойств объекта: его расположения, размеров его частей и деталей. Подход к восстановлению пещерных памятников архитектуры не требует точности обмеров аморфных форм, т.к. пещеры созданы не по чертежам, а интуитивно, опытным путем. Современные работы по восстановлению и развитию пещер могут проводиться также не по проекту, а непосредственно на месте.

Принципы формообразования пещерных культовых сооружений.

Если рассматривать понятие «Архитектура» в самом широком смысле как зодчество в целом, можно определить ее как *«вид человеческого творчества, изолирующий часть пространства, ценную для духовной и материальной жизни и деятельности человеческого индивидуума или коллектива, либо при помощи удаления соответствующего количества материальной массы, уже данной в природе, либо при помощи сооружения трехмерной материальной оболочки, отграничивающей изолируемый пространственный объем и воздвигаемой на участке земной поверхности, соответствующем этому объему»* - Габричевский А. Г. [1]. Из определения следует, что пространство и масса главные элементы архитектуры. Задачей же архитектурного формообразования является их закономерно объединить. Взаимоотношения между этими элементами определит своеобразие пещерных монастырей как индивидуального архитектурного организма или архитектурных образований в зависимости от степени проявления художественной воли при их формировании. Эстетические категории пространственная динамика и пластика формы (массы) имеют стихийный характер и являются первоосновой художественного формообразования [19]. К выявлению архитектурных особенностей культовых пещер нас приведет раскрытие их пространственных и пластических характеристик.

Формы пещерных монастырей, на первый взгляд не имеющих отношение к архитектуре, настолько тесно генетически связаны с ней, что могут быть рассматриваемы как ее первоисточники, с преобладанием именно пространственных качеств. Пещерное зодчество - это создание пространственных единиц путем выдалбливания их из природных аморфных масс, по определению Гегеля является «отрицательным зодчеством», «негативной

архитектурой» [1]. Этот тип архитектуры, исходя из феноменологического состава архитектурной данности, может быть рассмотрен как исток зарождения зодчества в направлении первобытной архитектуры.

В пределах творчества человека, в противопоставлении окружающей природе, есть грань между приспособительным и духовным формообразованием. Создание культовых пещер можно отнести к творчеству религиозному, метафизическому и художественному, имеющему духовную цель. Подобно массе, подземное пространство является основной категорией всякого живого органического творчества, как приспособительного, так и духовного [19]. В ряде случаев естественные полости в земной коре приспособлялись для проведения в них религиозных обрядов, захоронений, бытования монахов. Пещеры в меловых горах в устьях рек Дон и Оскол были выдолблены человеком и изначально имели духовные цели своего существования. Пещерные объекты можно разделить на две пространственно-художественные категории: статическое пространство и динамическое пространство. Статическое – приспособительное пространство, образует нейтральную, пустую, однообразную среду, используемую человеком. Такое пространство несет подчиненную функцию отделения одного объекта от другого - оно художественно не ценно и не является художественно формообразующим началом. Динамическое пространство - художественно абсолютно ценно, является основным первичным формообразующим началом. С одной стороны, пространство ограничивается (формируется) объемами, с другой – замкнутое пространство может формировать либо подчинять объем, находящийся внутри него, смотря что из них имеет большую духовную ценность, а что просто приспособлено.

В архитектурном творчестве динамика выражается в элементе внутреннего пространства, а статика — в элементе массы. Соотношение и взаимодействие этих категорий влияет на то будет ли объект художественно значим и эстетически ценен и насколько. *«Вот альфа и омега, исходный пункт и конечный результат всякого художественного исследования.»* - Габричевский А.Г. [1]. Внутреннее пространство пещер воспринимается фрагментарно, при движении, а значит не сразу, а в течении некоторого времени. Время, как и расстояние, обладает свойством протяженности, делится на отрезки и становится полноправной единицей измерения пространства. Архитектура пещер выражена свойствами внутреннего пространства – форма, размер,

протяженность. Эти свойства формируются удалением, выкапыванием, выдалбливанием необходимого пространственного объема в сплошной материальной, в основном, аморфной массе, данной в природе в виде земли, скалы и т.п., то есть преодолением противостоящей им неорганизованной матери, а значит, ее отрицанием. Первичное пещерное зодчество зависит от творческой приспособительной силы человека и от податливости материи. Пространство здесь является целью и ценностью, масса лишь преодолевается, лишь отрицается. Художественными пещеры делает сам момент пластики ограничивающей поверхности. Пространство пещерного монастыря ограничено природной массой, но эта масса не сформировала его, здесь именно само внутреннее пространство сформировало объект, а значит оно является динамическим и духовно ценным [19].

Пространство и масса являются первичными и, притом, полярными моментами, определяющими строение художественного архитектурного содержания [1]. Пещеру можно воспринять как пространственное внутреннее ценное ядро, заточенное в природную массу. Здесь пространство и масса едины, при этом их можно отдельно различить. На первый взгляд, возникшая при помощи удаления тектонической породы в виде бесформенной массы (отрицания), создает чистую пространственную форму, здесь еще значима и оболочка, не смотря на художественную недооформленность и отсутствие тектонической выразительности. Негативное зодчество предполагает массивную природную, данность. "Ядро — оболочка" является первичной исходной единицей, существенной наглядной категорией особой области культурного выражения. Структуру архитектурной формы можно определить с помощью трех позиций: внутреннее и внешнее пространство, и оболочка, которая их разграничивает. Внешней оболочкой пещеры является окружающая среда, которая связана с внутренним пространственным ядром только входной группой, в случае если таковая имеется, она же и является разграничением внутреннего и внешнего пространства. Внутренние архитектурные пространственные объемы являются архитектурными формами только в меру своей ограниченности, материальной оформленности. Внутреннее пространство пещеры обладает внутренней выразительностью, поскольку оно дано как нечто созданное, выстроенное, путем изъятия массы. В этом слое архитектурного художественного предмета ставится проблема материала, его свойств и технической обработки. Данный момент сравним

с процессом каменной кладки в наземной архитектуре, различных ее видов и способов строительства. Архитектурная форма пещерного зодчества - живое движение воспринимается как оставляющее за собой след или отпечаток на неорганизованной, аморфной материи, в течение определенного периода времени. Здесь архитектура, прикрепленная к определенному участку земной поверхности, имеет самостоятельное бытие и независима от физического присутствия человека, так как облекаемой ценностью является пространство, которое ему необходимо.

Феноменология пещерного зодчества Придонья и Приосколья. Структура пещерного монастыря состоит из коридоров продольной формы и центрических пространственных объемов в виде келий и храмов [6]. Пространство, окружающее движущегося человека, фиксируется продольными ходами, центрические пространственные объемы являются проекцией ядра, замкнутого в себе и недвижимого. Центрические объемы и продольные формы связываются между собой посредством соединения сложением, то есть присоединения отдельных самостоятельных элементов пространства либо деления (расчленения) общего пространства на части, выделяющиеся общим пространственным объемом. Таким образом, выражается сплошное динамическое единство, дифференцирующееся в процессе своего поэтапного становления. Внутреннее архитектурное пространство пещерного монастыря несет в себе формообразующий момент, а его динамика является антропоморфной, данной как функция [1]. Соединение структурных элементов формирует целостный образ, более мелкое детальное членение внутренних пространств выявляет определенную функцию каждого из них. Не все части доступны зрительному восприятию, здесь предметами выявления пространства служат недоступность, иррациональность, аморфность. Индивидуализация человека, находящегося внутри такого пространства, растворяется под влиянием стихийной мощи и динамики, выраженной в пропорциях, освещении, видимой атектоничности внутренних пещерных объемов. Эта внутренняя поверхность материальной оболочки выражает направление, силу и форму движений пространственного ядра. Материя подчинилась внутренней пространственной динамике, она обрела органическую форму и просто перестала существовать. Материальная оболочка перетекла в пластические образы, которые не ограничены горизонтальными и

вертикальными плоскостями, динамика оживила их изнутри.

Одной из причин отличия внешнего облика пещерного храма от наземного является отсутствие соответствия между экстерьером и внутренним видом, так как у пещерных монастырей фактически отсутствуют фасады. Архитектурно-средовые феномены пещерных пространств определяются в области тактильных свойств ограждающих поверхностей: шероховатость необработанной поверхности; ощущения прохлады и влажности при касании; сглаженность углов; неожиданные повороты, спуски и подъемы; теснота коридоров и помещений [17]. Восприятие внутреннего замкнутого пространства отличается фрагментарным обзором и зависимостью от источника света. Оценить интерьер пещер можно лишь на небольшом расстоянии от себя доступном зрению. Движение тени усиливает фактурность необработанной поверхностей меловых стен. При этом криволинейные формы коридоров усиливают ощущение преобладания природной силы. Дезориентация, создаваемая планировкой с непредвидимыми поворотами, усиливает ощущение смены реальности привычного нам мира. Асимметрия помещений и ходов, привязанных к пустотам естественного происхождения, усложняют запоминание пройденного пути и усиливают утомляемость, создавая ощущение большей протяженности по сравнению с действительной длиной пути. Пещерный монастырь открывает перед нами иной мир, который постижим далеко не каждым. И возможно, чтобы понять его необходимо пройти путь аскета обрести единение с Богом.

Пространство пещер не передает художественную суть, но является формообразующим началом, подчиняющим себе оболочку (массу). Человеческому сознанию свойственна двойственность мировосприятия: есть духовная и материальная сторона жизни. Это и есть типы двух основных мироощущений, которые называются пластическим и динамическим. Если перенести двойственность сознания между духом и материей в религиозный аспект, то можно отметить аналогичное противостояние между началом духовным и материальным, причем последнее в пещерном зодчестве не является приоритетом, здесь живая архитектурная форма снимает разграничение между духом и материей.

В пещерном пространстве нет привязки к вертикальным и горизонтальным плоскостям – нарушена привычная в наземной архитектуре система координат, выстраиваемая стенами и перекрытиями. Оси туннелей могут

располагаться свободно в любом направлении. Криволинейные формы коридоров усиливают ощущение преобладания природной силы. Каменная масса зрительно движется. Ощущения необузданной природной силы подчеркивает сложная планировка пещерных комплексов, неопределимая снаружи. Неожиданные повороты, подъемы и спуски, резкие разветвления криволинейных коридоров дезориентируют, принуждают забыть внешний мир и довериться внутренним ощущениям [2]. Характер самого материала, соразмерность структурных элементов и деталей, аморфность форм выражаются в наглядных свойствах архитектурных частей, отношение этих частей дано как живое взаимодействие, непрерывное движение, образующее целостный образ всего монастыря. Огромную роль здесь играет именно входная группа, так как связывает внешнюю среду с подземной частью, являясь лицом пещер, своеобразным порталом между двумя мирами. И конечно же именно эта деталь дает основание для восприятия пещерного монастыря как архитектурного объекта. Входная группа является важным критерием при проведении оценки архитектурной ценности пещерного памятника [20]. Форма и размер входной части служат наиболее яркими средствами выражения основных функций архитектурной оболочки, связывающих пространственное ядро с динамикой внешнего мира. Через архитектуру пещер сама природа участвует в культурном выражении.

Свойства формы и внутреннего пространства пещерного монастыря. Архитектурные объекты могут служить нескольким целям, в том числе и тем духовным и культурным целям самосознания человека, которым никогда не служили механизмы и орудия труда. Архитектурные формы пещерных монастырей не были спроектированы, но отвечали определенным историческим условиям и потребностям. Решить функциональные, планировочные, конструктивные и художественные задачи создателям пещерных пространств позволило проектное и образное мышление, на формирование которого повлияли история, критика и эстетика архитектуры наземного храмового зодчества.

Феноменология пещерного зодчества описывает восприятие подземных пространств человеком, их влияние на физическое и психоэмоциональное его состояние. Морфология формирует четкие градостроительные, архитектурные качества ограничивающей поверхности и подземного пространства, выражающиеся в числовом и геометрическом

эквиваленте. Символика выявляет связь с догматическими нормами храмостроительства и канонами проведения обрядов богослужения.

Таким образом, рассматривая взаимосвязь средств формообразования и свойств формы

пещерных монастырей Придонья и Приосколья, можно выявить значение принципов символики, морфологии и феноменологии в определении архитектурных особенностей формы пещер (рис. 3).

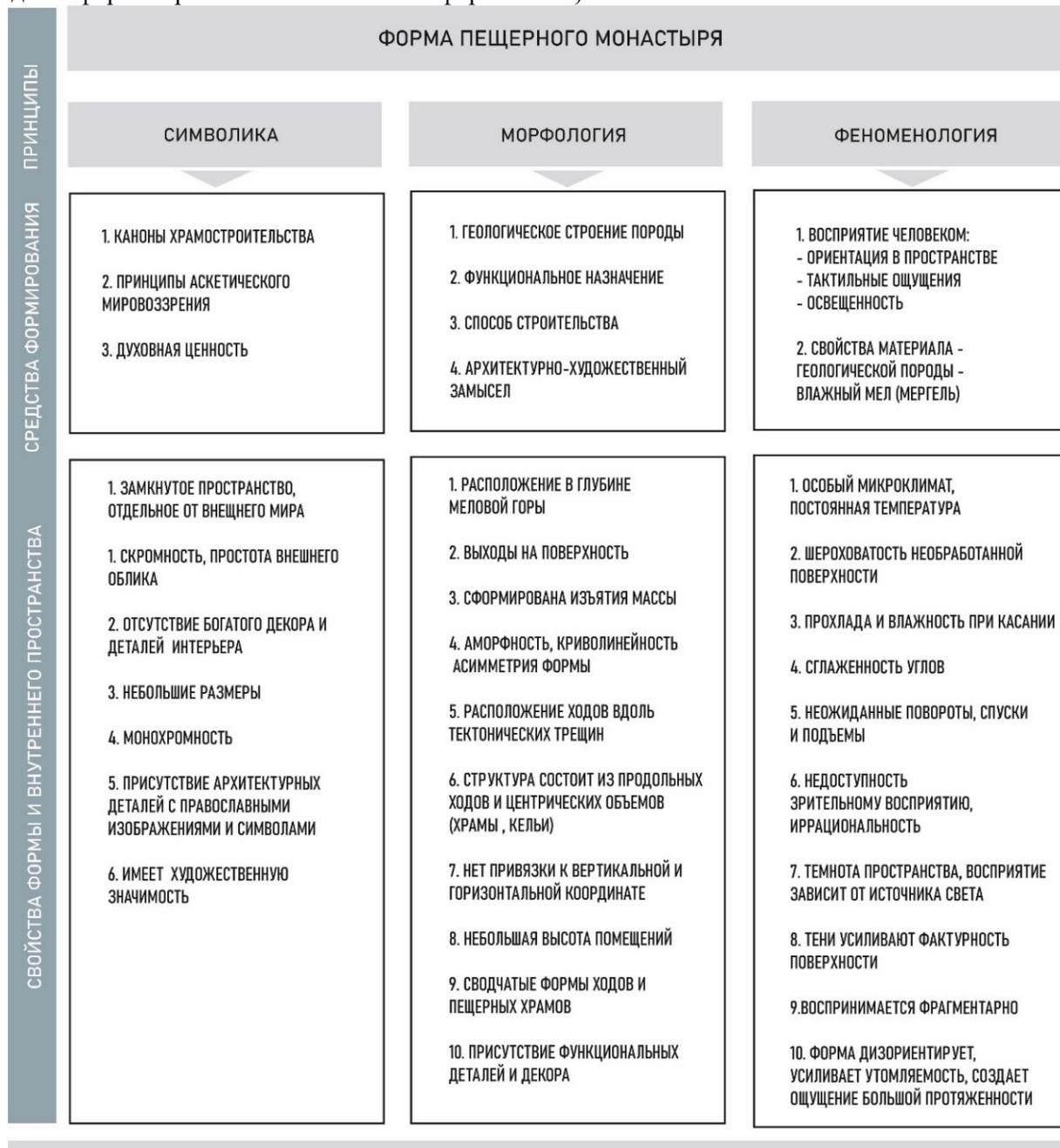


Рис. 3. Роль принципов символики, морфологии и феноменологии в формообразовании пещерных монастырей

Выявленные свойства формы и внутреннего пространства пещерного монастыря формируют его архитектуру. Анализ данных свойств даст возможность охарактеризовать архитектурные особенности, сохранность и значимость пещерного памятника.

Вывод. Морфология внутренних пространств пещерных монастырей имеет схожие черты с наземными храмами и монастырями. Ее художественную значимость нельзя отрицать или недооценивать поскольку многие архитектурные

формы и детали не являются необходимыми. Например, декоративные ниши и арки, сводчатые потолки пещерных храмов, колонны, разделяющие алтарь и храм, вырезанный декор и т.п. Это символические элементы, они не являются функциональными. Такие детали передают духовные концепции и передают помещению восприятие православного объекта – художественный образ, что входит в задачи тектоники. Тем не менее, устройство пещерного храма не идентично канонам строительства

наземной церкви. В пещерном зодчестве допустимы исключения из догматических норм храмостроительства. Ценность формы пещерного монастыря, с точки зрения ее научного объяснения, опирается на социально-культурные позиции, основанные на принципах аскетической идеологии, такие как отказ от роскоши, простота внешнего облика, уединение, удаление от мира, замкнутость. С преобразованием пещеры в пещерный монастырский комплекс, приспособительная функция заменяется конструктивным расчетом и художественно осознанной выразительной мыслью.

Особенности архитектурного формообразования пещерного зодчества складываются тремя видами описаний: символические, морфологические и феноменологические. Стоит подчеркнуть, что эти характеристики находятся в непосредственной взаимосвязи, поэтому выявление архитектурных особенностей пещерных монастырей будет неполным при игнорировании какой-либо из данных составляющих. Область феноменологических описаний пещерных монастырей задать сложнее чем области символики и морфологии. Феноменология представлена восприятием человека архитектурной формы, его ощущениями при непосредственном контакте и взаимодействии. Пещерные пространства нельзя понять и описать, если их не почувствовать. Феноменология архитектуры пещерного монастыря выражена не в понимании ее как системы символов и знаков, а в переживании эмоции и впечатления, которое она оказывает на человека. Переживание формы является акцентом. Пещерное пространство представляет собой не пустоту, а материал, формирующий архитектуру, который состоит из воздуха и темноты, фрагментарно рассеянной светом. В пещерном монастыре форма поверхности и ее символический смысл подчинены ощущениям и переживанию пространства.

Используя средства формообразования, в соответствии с принципами символики, морфологии и феноменологии, выявлены свойства формы и внутреннего пространства пещерных монастырей Придонья и Приосколья. Данные свойства являются определяющими при характеристике архитектурных особенностей культовых пещерных объектов. Меняя образ аскетичного уединенного места, теряется символический смысл существования пещерной обители, изменяются морфологические характеристики и феноменология формы внутреннего пространства. Памятник теряет аутентичность, а следовательно, и ценность с

точки зрения истории и культуры. Возникает вопрос об уместности новых расписных икон, резных узоров и лепнин в пещерных храмах, которые появляются стараниями местных энтузиастов. Ведь на сегодняшний день пещерного монашества как отдельной сферы деятельности не существует. Нет и монахов отшельников, скрывающихся от гонений. Остались только памятники истории и архитектуры, которые необходимо прежде всего сохранять, а не приукрасить, и именно в подлинном виде показывать очевидцам и потомкам, чтобы не нарушать связь с мотивами и смыслом возникновения. Прежде чем вносить свою лепту в судьбу пещерного памятника необходимо учесть все возможные последствия, влияющие на сохранение памятника и его историко-архитектурной ценности. Адаптация к современным условиям жизни не должна лишать объект этих качеств. Приоритет в подходе к восстановлению должен быть ориентирован прежде всего на сохранение исторического образа и свойств формы. Пещерные храмы и монастыри, сохранившиеся до наших дней, несут в себе традиции русского православного храмостроительства, сохраняя суть и канон обрядов богослужения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Габричевский А.Г. Пространство и масса в архитектуре. Рос. акад. худож. наук. Москва: Б. и., 1923. 18 с.
2. Плужников В.И. Пещерные монастыри на Дону и Осколе // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. Города, ансамбли, зодчие. М., Наука, 1985. 242 с.
3. Амелькин А.О. Древнейший монастырь Воронежского края // Труды преподавателей и выпускников Воронежской Православной Духовной Семинарии. 2012. № 6. С. 387–404.
4. Степкин В.В. Пещерные памятники Среднедонского региона // Культовые пещеры Среднего Дона. М.: РОСИ, 2004. Вып. 4. С. 41–137. (Сер. Спелестологические исследования).
5. Агапов И.А. Краткий обзор возникновения и развития культовых пещерных памятников Среднего Придонья // Культовые пещеры Среднего Дона. Вып. 4. М., 2004. С. 198–210
6. Полева Ю.В. Пещерное подвижничество на территории Нижнего Поволжья и Подонья во второй половине XVII-начале XX вв.: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. ист. наук специальность 07.00.02 / Полева Юлия Владимировна; Волгогр. гос. ун-т. Волгоград, 2009. 33 с.
7. Гунько А.А., Кондратьева С.К., Гунько А.П. Пещеры у села Холки // Спелеология и спелеология: сб. мат. V международной науч. заоч.

конф. Набережные Челны: НИСПТР, 2014. С. 192–201.

8. Шевченко Ю.Ю. Пещерные христианские монастыри Подонья: Начало традиции // Изобразительные памятники: Стиль, эпоха, композиция. Материалы тематической научной конференции. Санкт Петербург, 1–4 декабря 2004 г. СПб., 2004. С. 196–201.

9. Лидов А.М. Иеротопия. Создание сакральных пространств как вид творчества и предмет исторического исследования // Иеротопия. Создание сакральных пространств в Византии и Древней Руси: сборник материалов Международного симпозиума / редактор-составитель А.М. Лидов. Москва: Индрик, 2006. С. 9–31.

10. Степкин В.В. Афон и Подонье в конце XIX начале XX вв.: контакты в контексте возрождения Шатрищегорского пещерного монастыря // Вестник Православного Свято-Тихоновского гуманитарного университета. Серия II: История. История Русской Православной Церкви. Вып. 75, 2017. С. 39–54.

11. (Христос Яннарас). Христос Яннарас. Вера Церкви (Введение в православное богословие). М; 1992. 92 с.

12. Климков О.С. Исихия и философия в доктрине Григория Паламы // Философская мысль, 2017. № 5. С. 14–30. DOI: 10.7256/2409-8728.2017.5.22444

13. Прохоров Г.М. Исихазм // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/isikhazm-5abeff/?v=9572458>. Дата публикации: 30.05.2023. Дата обновления: 29.01.2024.

14. Вовженяк П.Ю., Ярмош Т.С. Интерпретация как метод исследования в архитектурном

проектировании // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2024. № 8. С. 66–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-66-75

15. Петров-Спиридонов Н.А. Семантика «тварного» и «нетварного» света в русском церковном зодчестве // Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия 2021. №3 (56). DOI: 10.24412/1998-4839-2021-3-195-213

16. Вовженяк П.Ю. Методы проведения исследований пещерных монастырей в целях их сохранения // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2022. Т. 4. № 4. С. 49–58. DOI: 10.34031/2687-0878-2020-2-3-62-69

17. Раппапорт А.Г. К пониманию архитектурной формы // Диссертация на соискание ученой степени доктора искусствоведения, представленная в форме научного доклада. Москва 2000. 140 с.

18. Плужников В.И. Термины российского архитектурного наследия: Архитектурный словарь. М.: Искусство-XXI век, 2011. 424 с

19. Явейн О.И. О некоторых базовых положениях теоретического наследия Александра Георгиевича Габричевского // АМІТ. 2015. №4 (33). С.5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotoryh-bazovyh-polozheniyah-teoreticheskogo-naslediya-aleksandra-georgievicha-gabrichhevskogo> (дата обращения: 06.10.2024).

20. Захарова Е.Ю.? Кондратьева С.К. Архитектурные и археологические памятники Дивногорья (история изучения) // Труды музея-заповедника «Дивногорье». Вып.2. Воронеж: Кварта, 2011. 216 с.

Информация об авторах

Вовженяк Полина Юрьевна, старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: polina.vov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 14.10.2024 г.

© Вовженяк, 2025

Vovzhenyak P.Y.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: polina.vov@mail.ru*

FEATURES OF THE SYMBOLISM, MORPHOLOGY AND PHENOMENOLOGY OF THE ARCHITECTURE OF THE CAVE MONASTERIES OF PRIDNESTROVIE AND PRIOSKOLYE

Abstract. *This article examines the architectural aspect of the creation and use of cave spaces in Pridnye and Prioskolye. The use of caves as places of worship intended for conducting religious rites is considered using the examples of cave monasteries in the Voronezh and Belgorod regions, formed in the Cretaceous deposits of this territory. The relevance of this topic is due to the threat of loss of cave monuments of the 13th-*

19th centuries under the influence of temporary, natural and anthropogenic factors. The main objectives are to identify the symbolic meaning of the creation and existence of cave monasteries, to identify the techniques of morphological description and phenomenology of the formation of cave architecture in this region. The research methodology is based on the principles of phenomenological research, its basis is the materials of expert assessments of the preservation of underground monastic complexes, in-kind survey, measured drawings, drawings, photo fixation of individual objects. The article considers the process of cave digging from the point of view of symbolism; the principles of the ascetic worldview on which the architectural features of the form of underground spaces are based are revealed; The means and methods of morphological description of the interior space of caves are studied, their examples are given; fragmentary perception of cave spaces by humans, the spatial structure of the cave monastery, the moment of its formation are described. The symbolism, morphology and phenomenology of the cave monasteries of Pridonye and Prioskolye allow us to systematize the concepts of their architectural forms. The priority in the approach to restoration and adaptation to modern living conditions should be focused primarily on preserving authenticity.

Keywords: cave digging, symbolism, morphology, phenomenology, cave monasteries, architecture, underground space, shaping.

REFERENCES

1. Gabrichevsky A.G. Space and mass in architecture [Prostranstvo i massa v arhitekture]. Russian Academy of Sciences. arts. sciences. Moscow: B. I., 1923. 18 p. (rus)
2. Pluzhnikov V.I. Cave monasteries on the Don and Oskol [Peshchernye monastyri na Donu i Oskole]. Monuments of Russian architecture and monumental art. Cities, ensembles, architects. M., Nauka, 1985. 242 p. (rus)
3. Amelkin A.O. The oldest monastery in the Voronezh region [Drevnejshij monastyr' Voronezhskogo kraja]. The works of teachers and graduates of the Voronezh Orthodox Theological Seminary. 2012. No. 6. Pp. 387–404. (rus)
4. Stepkin V.V. Cave monuments of the Middle Don region [Peshchernye pamyatniki Srednedonskogo regiona]. Cult caves of the Middle Don. M.: ROSI, 2004. Issue 4. Pp. 41–137. (Ser. Speleological studies). (rus)
5. Agapov I.A. A brief overview of the emergence and development of cult cave monuments of the Middle Don region [Kratkij obzor vozniknoveniya i razvitiya kul'tovyhpeshchernyh pamyatnikov Srednego Pridon'ya]. Cult caves of the Middle Don. Issue 4. M., 2004. Pp. 198–210. (rus)
6. Poleva Yu.V. Cave asceticism on the territory of the Lower Volga region and the Don region in the second half of the XVII-early XX centuries [Peshchernoe podvizhnichestvo na territorii Nizhnego Povolzh'ya i Podon'ya vo vtoroj polovine XVII-nachale XX vv.]: abstract. on the job. learned. step. Candidate of Historical Sciences: specialty 07.00.02 Poleva Yulia Vladimirovna; Volgogr. state University. - Volgograd, 2009. 33 p. (rus)
7. Gunko A.A., Kondratieva S.K., Gunko A.P. Caves near the village of Withers [Peshchery u sela Holki]. Speleology and speleology: collection of mat. V International Scientific part-time conf. Naberezhnye Chelny: NISPTR, 2014. Pp. 192–201. (rus)
8. Shevchenko Yu.Yu. Cave Christian monasteries of the Don region: The beginning of tradition [Peshchernye hristianskie monastyri Podon'ya: Nachalo tradicii]. Pictorial monuments: Style, epoch, composition. Materials of the thematic scientific conference. St. Petersburg, December 1-4, 2004. St. Petersburg, 2004. Pp. 196–201. (rus)
9. Lidov A.M. Hierotopia. The creation of sacred spaces as a type of creativity and the subject of historical research [Ierotopiya. Sozдание sakral'nyh prostranstv kak vid tvorchestva i predmet istoricheskogo issledovaniya]. Hierotopia. The creation of sacred spaces in Byzantium and Ancient Russia: a collection of materials of the International Symposium. Editor-compiler A.M. Lidov. Moscow: Indrik, 2006. Pp. 9–31. (rus)
10. Stepkin V.V. Athos and the Don region at the end of the 19th and beginning of the 20th centuries: contacts in the context of the revival of the Shatrishchegorsk cave monastery [Afon i Podon'e v konce XIX nachale XX vv.: kontakty v kontekste vozrozhdeniya Shatrishchegorskogo peshchernogo monastyrya]. Bulletin of the Orthodox St. Tikhon's Humanitarian University. Series II: History. History of the Russian Orthodox Church. Vol. 75, 2017. Pp. 39–54.
11. (Christ Yannaras). Christ Yannaras. The Faith of the Church (An Introduction to Orthodox Theology) [Vera Cerkvi (Vvedenie v pravoslavnoe bogoslovie)]. M; 1992. 92 p. (rus)
12. Klimkov O.S. Hesychia and philosophy in the doctrine of Gregory Palamas [Isihiya i filosofiya v doktrine Grigoriya Palamy]. Philosophical Thought, 2017-5 Pp. 14–30. DOI: 10.7256/2409-8728.2017.5.22444 (rus)
13. Prokhorov G.M. Hesychasm [Isihazm]. The Great Russian Encyclopedia: scientific and educational portal. URL: <https://bigenc.ru/c/isikhazm-5a6eff/?v=9572458>. Date of publication: 30.05.2023. Date of update: 29.01.2024. (rus)
14. Vovzhenyak P. Yu., Yarmosh T. S. Interpretation as a research method in architectural design [Interpretaciya kak metod issledovaniya v

arhitekturnom proektirovanii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 66–75. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-8-66-75 (rus)

15. Petrov-Spiridonov N.A. Semantics of “created” and “uncreated” light in Russian church architecture [Semantika «tvornogo» i «netvornogo» sveta v russkom cerkovnom zodchestve]. Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia 2021. No. 3 (56). DOI: 10.24412/1998-4839-2021-3-195-213(rus)

16. Vovzhenyak P.Yu. Methods of conducting research on cave monasteries in order to preserve them [Metody provedeniya issledovaniy peshchernyh monastyrej v celyah ih sohraneniya]. Technical aesthetics and design research. 2022. Vol. 4. No. 4. Pp. 49–58. (rus)

17. Rappaport A.G. Towards understanding architectural form [K ponimaniyu arhitekturnoj formy]. Dissertation for the degree of Doctor of Art History, presented in the form of a scientific report. Moscow 2000. 140 p. (rus)

18. Pluzhnikov V.I. Terms of the Russian architectural heritage: Architectural dictionary [Terminy rossijskogo arhitekturnogo naslediya: Arhitekturnyj slovar']. Moscow: Iskusstvo-XXI century, 2011. 424 p. (rus)

19. Yavein O.I. On some basic provisions of the theoretical legacy of Alexander Georgievich Gabrichevsky [O nekotoryh bazovyh polozheniyah teoreticheskogo naslediya Aleksandra Georgievicha Gabrichevskogo]. AMIT. 2015. No.4 (33). pp. 5 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-bazovyh-polozheniyah-teoreticheskogo-naslediya-aleksandra-georgievicha-gabrichevskogo> (date of reference: 06.10.2024). (rus)

20. Zakharova E.Y., Kondratieva S.K.. Architectural and archaeological monuments of Divnogorie (history of study) [Arhitekturnye i arheologicheskie pamyatniki Divnogor'ya (istoriya izucheniya)]. Proceedings of the Divnogorye Museum-Reserve. Vol. 2. Voronezh: Kvant, 2011. 216 p. (rus)

Information about the author

Vovzhenyak, Polina Y. Senior lecturer Departments of Architecture and Urban Planning. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 14.10.2024

Для цитирования:

Вовженяк П.Ю. Особенности символики, морфологии и феноменологии архитектуры пещерных монастырей Придонья и Приосколья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 69–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-69-82

For citation:

Vovzhenyak P.Y. Features of the symbolism, morphology and phenomenology of the architecture of the cave monasteries of Pridnestrovie and Prioskolye. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No.7. Pp. 69–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-69-82

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-83-93

¹Боровской А.Е., ²Смирнова А.Ю., ³Бердников М.Н.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение
«Городской центр управления парковками».³Публичное акционерное общество "Авиакомпания "ЮТэйр".

*E-mail: alex.perkova2000@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ВНОВЬ ВОЗВОДИМЫХ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИЛЕГАЮЩИЕ УЧАСТКИ УДС

Аннотация. Архитектурно-планировочная организация города, архитектурно-строительное проектирование новых объектов капитального строительства (ОКС) неразрывно связаны с функционированием транспортной системы города как единого целого, так и определенных прилегающих участков улично-дорожной сети (УДС). Проектируя новые кварталы/микрорайоны необходимо заранее оценивать прогнозируемую нагрузку на УДС; достаточное количество и функционирование парковочных мест на территории возводимого ОКС; доступность общественного транспорта. Именно комплексная оценка участка, отведенного под застройку нового ОКС позволит организовать удобную и благоприятную среду для его жителей и города в целом. Данное исследование проводилось с использованием инструмента геоинформационных систем NextGIS QGIS с учётом данных, взятых в результате обследования сотовых операторов ООО «ИнфоНет Мобил», а также мастер-плана застройки с технико-экономическими показателями. Предлагаемая методика экспресс анализа влияния возводимых ОКС на прилегающие участки УДС, позволяет произвести расчёт матрицы транспортного взаимодействия между кварталами и транспортными зонами города (расчёт существующей и прогнозируемой нагрузки на УДС), рассчитать функционирование транспортного пространства МКД и оценить прогнозируемое комплексное транспортное обслуживание конкретного возводимого ОКС. Методика апробирована в городе Белгороде на примере жилого комплекса ул. Донецкая – ул. Волчанская, разрабатываемого ООО СЗ "УК ЖБК-1". Результаты показали необходимость проработки новых транспортных коридоров для обеспечения связанности данного микрорайона с другими транспортными зонами города, сокращения заторов и времени нахождения в пути жителей, вновь возводимых ОКС.

Ключевые слова: геоинформационные системы (ГИС), интеллектуальная транспортная система (ИТС), макромодел, мезомодель, объект капитального строительства (ОКС), матрица корреспонденции (МК), транспортное зонирование, генеральный план, улично-дорожная сеть (УДС).

Введение. Процесс автомобилизации и увеличение интенсивности движения были характерны еще в 1910 г. Профессор Г.Д. Дубелир в монографии описывает тенденцию «увеличения интенсивности экипажей и, в особенности, автомобилей», которая до сих пор признается важнейшим фактором при планировании городского пространства.

К 1930-м годам в Советском Союзе была разработана достаточно эффективная методика транспортного планирования, которая подразумевала изучение мобильности населения и дальности поездок путем опроса пассажиров на различных видах транспорта; поиск путей в зависимости от преодолеваемого расстояния; поиск способов увеличения пропускной способности отдельных звеньев и узлов транспортной системы; оценка экономической эффективности различных вариантов. Однако советское правительство не сразу приняло такую методику о городах, дорогах и автомобилях. Ещё долгое время «картинки, а не расчёты» полностью отвечали

большевистской идеологии. Генеральные планы Москвы и Ленинграда 1930-х гг. в результате стали вехами в истории советского транспортного планирования. Впервые появился транспортный раздел Генерального плана - официальный документ, регламентирующий вопросы транспортного планирования. В 1990-2000 гг. в России градостроительная документация практически отсутствовала, а комплексные транспортные схемы перестали быть обязательными. Основными документами 1990–2000 гг. в области транспорта были комплексные схемы управления дорожным движением (КСУДД) и проекты управления дорожным движением (ПУД) [1]. Однако в мировой практике данные документы относятся скорее к инжинирингу, нежели к транспортному планированию. Фактически развитие транспортного планирования во всех городах России началось в 2010-х годах, когда транспортные заторы стали повсеместной неотъемлемой частью каждого жителя страны. До 2014 года в Градостроительном кодексе не было даже такого

понятия как «транспортное планирование» и осуществлялось оно в виде бюджетных проектов, предоставляемых администрациями города или района.

Таким образом, в связи с высоким уровнем автомобилизации, проблема оптимизации и совершенствования как транспортной инфраструктуры в целом, так и отдельно взятых участков УДС остается актуальной и на сегодняшний день. Совершенствование и разработка новых информационных систем, способных анализировать транспортные потоки по основным параметрам особенно необходимо в нынешнее время. В России до сих пор отсутствуют подобные систематические исследования ТП, что не позволяет объективно анализировать ежегодные перемещения жителей, выявлять наиболее загруженные узлы улично-дорожной сети. Последние годы оценка проводилась на основе данных, предоставляемых организациями, занимающимися перевозкой пассажиров (пассажиरोоборот). Современные тенденции развития УДС, большой уровень прироста автомобилизации и мобильность населения требует внедрения интеллектуальных систем (имитационных моделей) по сбору точных данных о полных характеристиках транспортных потоков, маршрутах движения как в границах конкретной агломерации, так и на отдельных участках улично-дорожной сети в рамках строительства новых жилых объектов [2]. Следовательно, в рамках развития интеллектуальной системы (ИТС) города Белгорода требуется разработка методики экспресс анализа возводимых ОКС на прилегающие участки УДС [3–5].

Существующие методы создания макро и мезомоделей подразумевают большие натурно-статистические исследование, формирование точного графа дорог [6] и значительные временные затраты на калибровку модели. При этом разработанные модели смогут решить задачи по нагрузке как всей улично-дорожной сети (УДС) города, так и отдельных транспортных узлов с учетом постоянно изменяющейся автомобилизации населения. При этом влияние вновь проектируемых микрорайонов или возводимых новых объектов капитального строительства (ОКС) учитываются крайне в упрощенном виде на основании утвержденных схем территориального планирования (СТП). В связи с этим просчитать потенциальную нагрузку на прилегающие участки УДС и рассчитать протяженность пешеходных связей с учетом [7, 8] становится невозможным. Исходя из вышеизложенного необходима разработка методики оперативной оценки влияния ОКС на прилегающую УДС с точки зрения транспортных и пешеходных потоков.

Материалы и методы. Целью исследования является разработка методики экспресс анализа влияния вновь проектируемых микрорайонов или возводимых новых ОКС на прилегающих участках УДС. Объект исследования – транспортно-дорожная сеть г. Белгорода. В ходе работы произведена оценка мастер-плана жилого комплекса ул. Донецкая – ул. Волчанская, на основании которого выполнен прогнозирующий расчет функционирования парковочного пространства МКД. Исследуемая территория разбита на транспортные зоны и определено количество рабочих мест и его процент от общего количества по городу с использованием инструмента Геоинформационных систем NextGIS QGIS. Далее были определены геометрические центры транспортных зон и проектируемого ОКС, их соединение кратчайшими расстояниями при помощи анализа в ГИС (в данном случае из ГИС ЦОДД Белгородской агломерации). На основании произведенного анализа была рассчитана матрица транспортного взаимодействия между кварталами и транспортными зонами, её существующей и перспективной нагрузки на УДС.

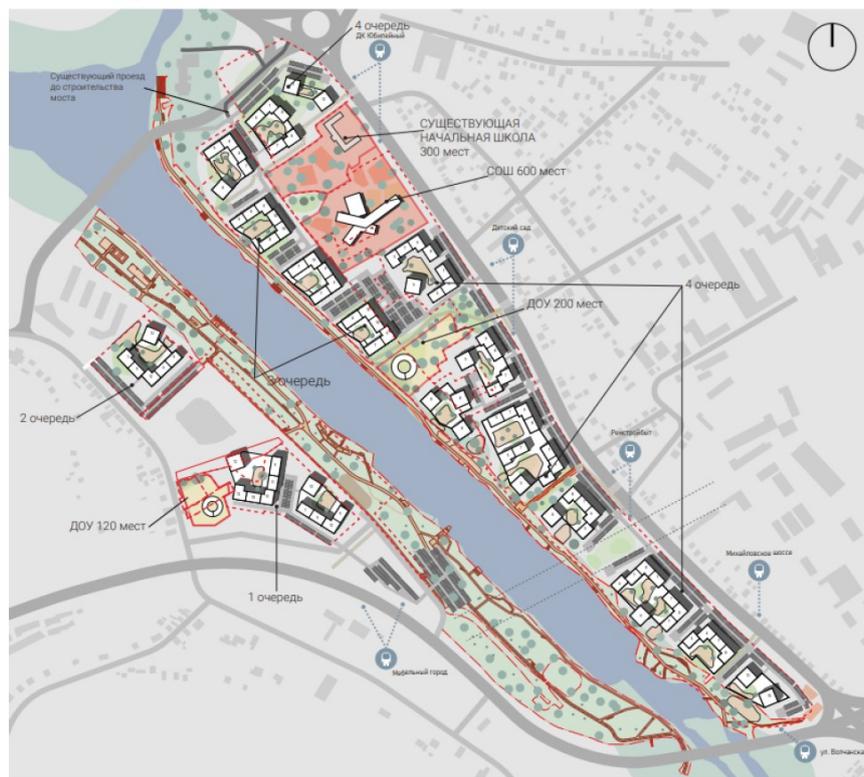
Основная часть. Инструментом решения поставленной задачи являются Геоинформационные системы, в данном исследовании применялась NextGIS QGIS [9]. Первым шагом при создании любой модели становится сбор исходной информации. При этом данная информация должна отвечать следующим требованиям: быстро собираема; адекватна реальной ситуации на УДС; геодезически привязана к исследуемой территории; обрабатываема существующими инструментальными возможностями (общедоступным ПО); результаты должны адекватно интерпретироваться.

На первом этапе, основным исходным документом при оценке ОКС с точки зрения его транспортного обслуживания является мастер-план/ген.план с технико-экономическими показателями. В данном исследовании предлагаемая методика рассматривается на примере жилого комплекса ул. Донецкая – ул. Волчанская, разрабатываемого ООО СЗ "УК ЖБК-1". Пример ТЭП и мастер-плана застройки представлен на рисунке 1.

На втором этапе, исходя из КСОДД г. Белгорода производится 3 сценария расчетов, которые включают существующий уровень автомобилизации населения 345 авт./тыс.чел., перспективный уровень автомобилизации 480 авт./тыс.чел и количество машиномест (автомобилей) согласно постановлению администрации г. Белгорода [10, 11], а так же правилам землепользования в г. Белгороде [12] (75 % от количества квартир). Разрабатываемые сценарии являются фактическими, перспективными и 75 %.

Для рассматриваемого микрорайона с учетом его количества жителей данные сценарии по

оптимальному количеству машино-мест представлены в таблице 1 с разбивкой по очередям ввода объектов.



УКРУПНЕННЫЕ ТЭП		Продаваемая площадь, м²
1 очередь	Многоквартирные жилые дома 6-11 этажей	29170
2 очередь	Многоквартирные жилые дома 6-11 этажей	14328
3 очередь	Многоквартирные жилые дома 5-8 этажей	51022
	Первый этаж коммерческий	1086
4 очередь	Многоквартирные жилые дома 5-11 этажей	88255
	Первый этаж коммерческий	7403
Итого продаваемая площадь квартир для всей территории		182775
Итого площадь коммерции		8489

— Границы землепользования

Рис. 1. Мастер-план жилого комплекса ул. Донецкая - ул. Волчанская

Таблица 1

Количество машиномест при различных сценариях транспортного обслуживания МКД

Определение объемов парковочного пространства в машиноместах № очереди	Фактический	Перспективный	75 %
1	522	734	437
2	257	361	215
3	912	1282	763
4	1579	2219	1320
Всего	3670	4596	2734

Доля коммерческой площади составляет 8489 м², что составляет не более 4,4%, поэтому в учете расчета машиномест она не учитывается.

Графики функционирования парковочного пространства в течении суток определяются в соответствии с [13] и для МКД в соответствии с таблицей 1 будут иметь вид, представленный на рисунке 2.

Благодаря данной методики таким же образом можно построить графики функционирования каждой очереди и отследить изменения нагрузки на прилегающих участках УДС по мере их ввода в эксплуатацию.

На третьем этапе, на основании характеристики движения транспорта в течении рабочего дня на парковочном пространстве, необходимо

определить маршруты движения личного транспорта и их количественные значения. Данные значения можно определить по распределению количества рабочих мест и транспортным зонам [14–16]. Таким образом, на данном этапе происходит выделение одиннадцати транспортных зон на исследуемой территории, на основании которых, в дальнейшем, будет строиться матрица корреспонденции. Благодаря такой методики получим объективные данные о количестве проживающих (плотности населения) в каждой транспортной зоне, проследить их перемещение в зависимости от дня недели и времени суток. В соответствии с концепцией развития транспорта города Белгорода и его пригородной зоны [17] транспортное зонирование территории г. Белгорода представлено на рисунке 3.

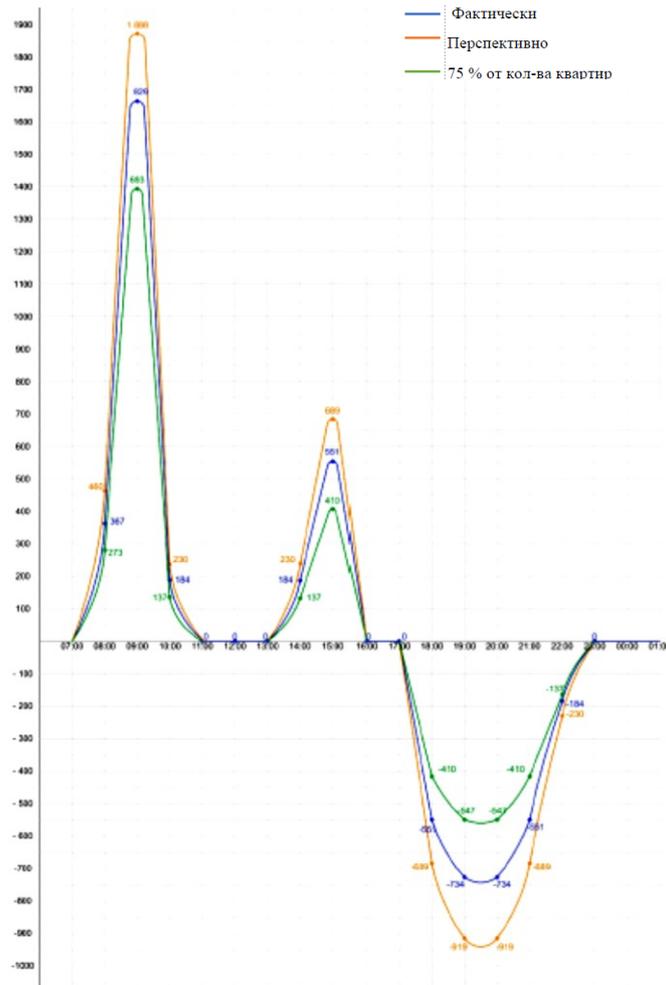


Рис. 2. График функционирования парковочного пространства МКД

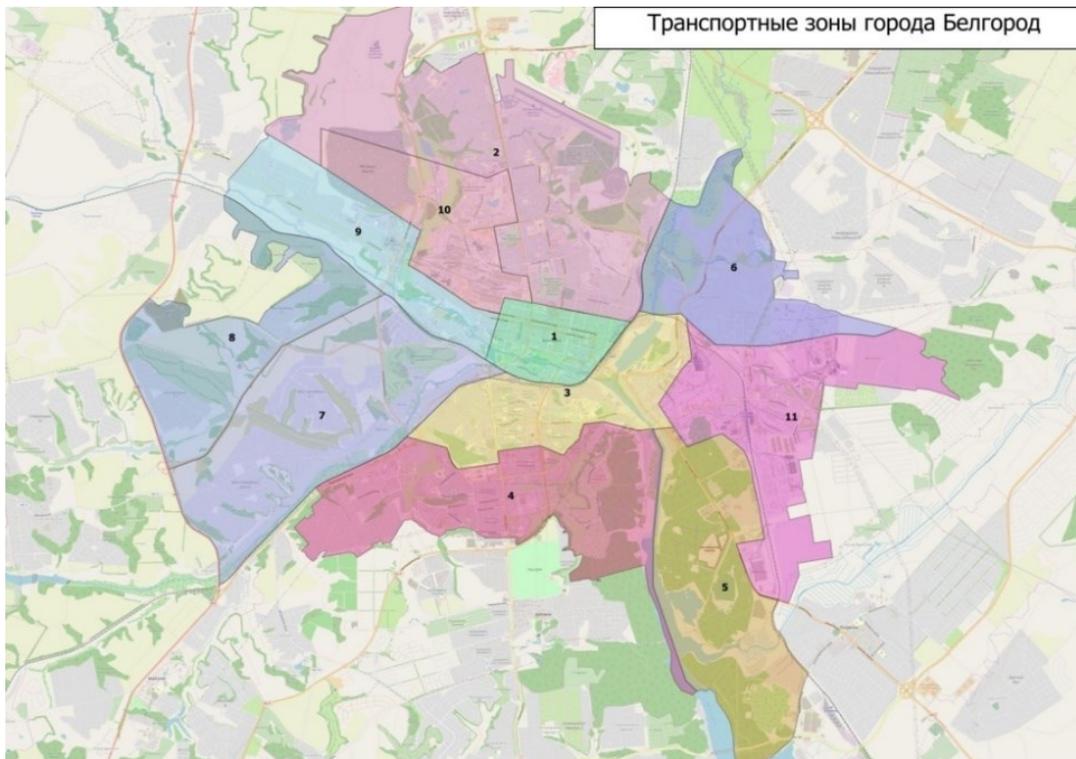


Рис. 3. Разбивка территории г. Белгорода на транспортные зоны.
Разраб. Боровской А.Е., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников

На четвертом этапе определяется распределение рабочих мест и их численность при помощи данных, взятых в результате обследования сотовых операторов ООО «ИнфоНет Мобил» [18,19]. Именно «реальные» цифры позволяют более точно определить количество и перемещение людей из ОКС и оценить нагрузку УДС, а также выявить различные варианты для увеличения пропускной способности узла УДС в новом микрорайоне. Определение наиболее точной численности и плотности рабочих мест играет важную роль при расчёте существующей и перспективной нагрузки на УДС.

Вся работа проводится с применением ГИС (QGIS), что в последующем позволит оптимизировать транспортное и градостроительное планирование территории, улучшить инфраструктуру города, решить ключевые градостроительные конфликты в г. Белгороде, создать наиболее комфортные условия для проживания [20,21]. Отдельно для каждой транспортной зоны определяется количество рабочих мест и процент от их общего количества по городу (рис.4). Предполагается, что именно в этом процентном соотношении из нового микрорайона будет распределяться транспортный поток.

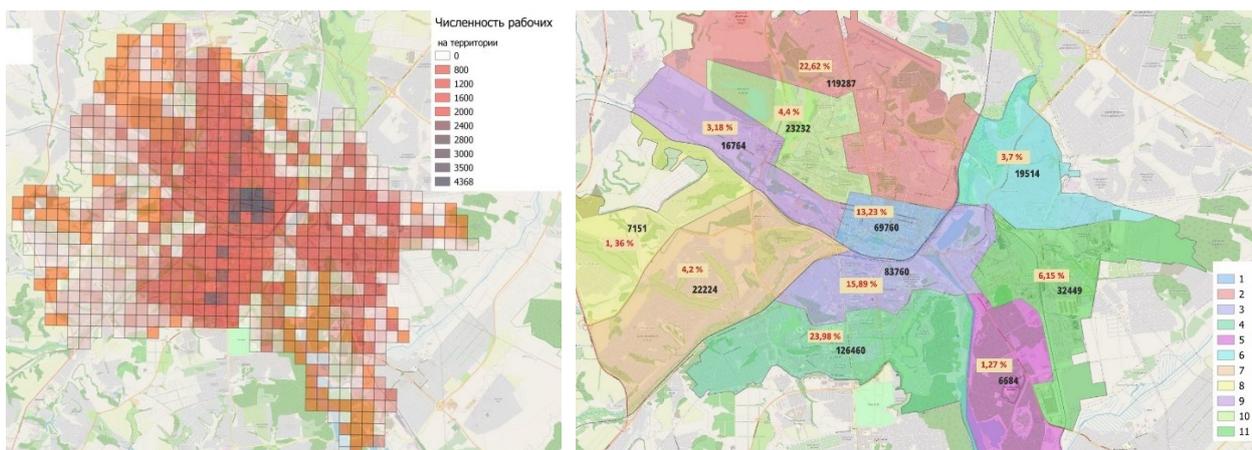


Рис. 4. Численность и распределение рабочих мест на территории Белгородской городской агломерации
Разраб. Боровской А.Е., К.Л. Смирнов, М.Н. Бердников

На пятом этапе, определение траекторий движения транспорта (рис.5) из проектируемого микрорайона МКД производится инструментарием поиска кратчайших и быстрееших расстоя-

ний (по оценки GPS/ГЛОНАСС трекам) средствами ГИС-систем с применением центрально-взвешенных точек транспортных зон и графом дорог по реальной улично-дорожной сети, взятой из ГИС ЦОДД Белгородской агломерации [22].



Рис. 5. Траектории движения от проектируемого микрорайона МКД до средневзвешенных точек транспортных зон. Разраб. Боровской А.Е.

Однако, чем дальше расстояние от точки излучения транспортного потока, тем ниже вероятность следования ТС по выбранному маршруту. Таким образом, данное распределение может работать только на прилегающих участках УДС. В данном случае рассматриваются крупные прилегающие узлы УДС, в которых проводят натурные исследования или берутся данные с ИТС прилегающих пересечений [23].

На шестом этапе производится расчёт матрицы транспортного взаимодействия между кварталами и транспортными зонами, которая содержит все статистические данные о перемещении ТС между транспортными зонами [24, 25]. Важно отметить, что именно матрица корреспонденции (МК) является одной из ключевых характеристик практически всех существующих транспортных моделей. Поскольку она предоставляет наиболее точные данные о транспортной миграции между районами агломерации (транспортными зонами), а также проанализировать перемещение ТС между отдельно взятыми узлами улично-дорожной сети.

Изначально в QGIS создаем полигонный слой, на котором обозначены границы транспортных зон, а также точечный слой с персональными идентификаторами. Далее на новом слое с помощью плагина QNEAT3 строим изохрону всех возможных вариантов перемещений внутри этих транспортных зон. Полученный файл .shp импортируем с среды Jupyter notebook для дальнейшего обновления информации с помощью библиотеки Geopandas. Преобразованный файл подгружаем в .qml формат. Таким образом, в полученном документе содержится таблица, которой представлен анализ перемещения транспортных средств между выделенными транспортными зонами территории. Итоговый формат документа в дальнейшем используем для визуализации изохроны среде QGIS.

Далее, с помощью полученных данных, рассчитывается существующая и перспективная нагрузка на конкретный исследуемый узел улично-дорожной сети (рис. 6).

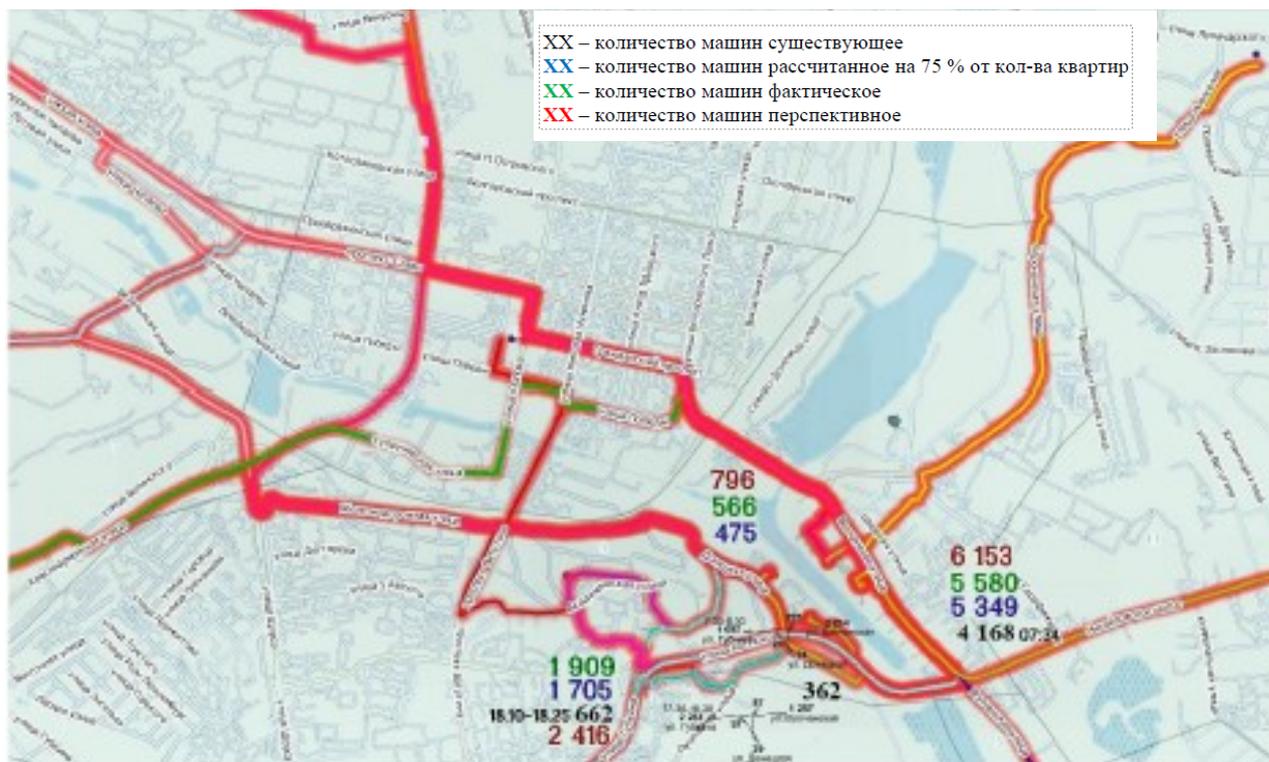


Рис. 6. Расчёт существующей и перспективной нагрузки на УДС
Разраб. Боровской А.Е.

Выводы. Таким образом, на основании представленных данных по строительству нового микрорайона видно, что нагрузка на УДС и прилегающие ей узлы значительно увеличивается. Именно поэтому возникает необходимость в проработке новых транспортных коридоров для обеспечения связности данного микрорайона с

другими транспортными зонами города, сокращения заторов и времени нахождения в пути жителей вновь возводимых ОКС.

На рисунке 7 представлены предложения для улучшения работы УДС и прилегающих узлов на рассматриваемом участке застройки жилого комплекса ул. Донецкая - ул. Волчанская:

1. Проектирование и строительство нового участка дороги через р. Северский Донец с целью снижения транспортной нагрузки с ул. Волчанская и ул. Корочанская, а также с пересечения ул. Волчанская и ул. Костюкова.

2. Совершенствование пересечения ул. Костюкова и ул. Губкина с помощью организации светофорного регулирования позволит увеличить пропускную способность движения транспортных средств в сторону п. Дубовое.

3. Строительство развязки на пересечении ул. Костюкова и ул. Донецкая и организация светофорного регулирования позволит увеличить поток транспортных средств, движущихся из центра в район Харьковской горы.

4. Реконструкция пересечения ул. Волчанская и ш. Михайловское, увеличение полос движения, изменения цикла светофорного регулирования.

Оценка эффективности принятых решений осуществляется при помощи имитационного мезо моделирования с помощью специализированного программного обеспечения Aimsun, PTV, Sumo.

На седьмом этапе производится оценка доступности общественного транспорта на основе оценки расстояния до остановок и связанности проектируемого микрорайона МКД с транспортными зонами с помощью ГИС-систем (рис. 8).

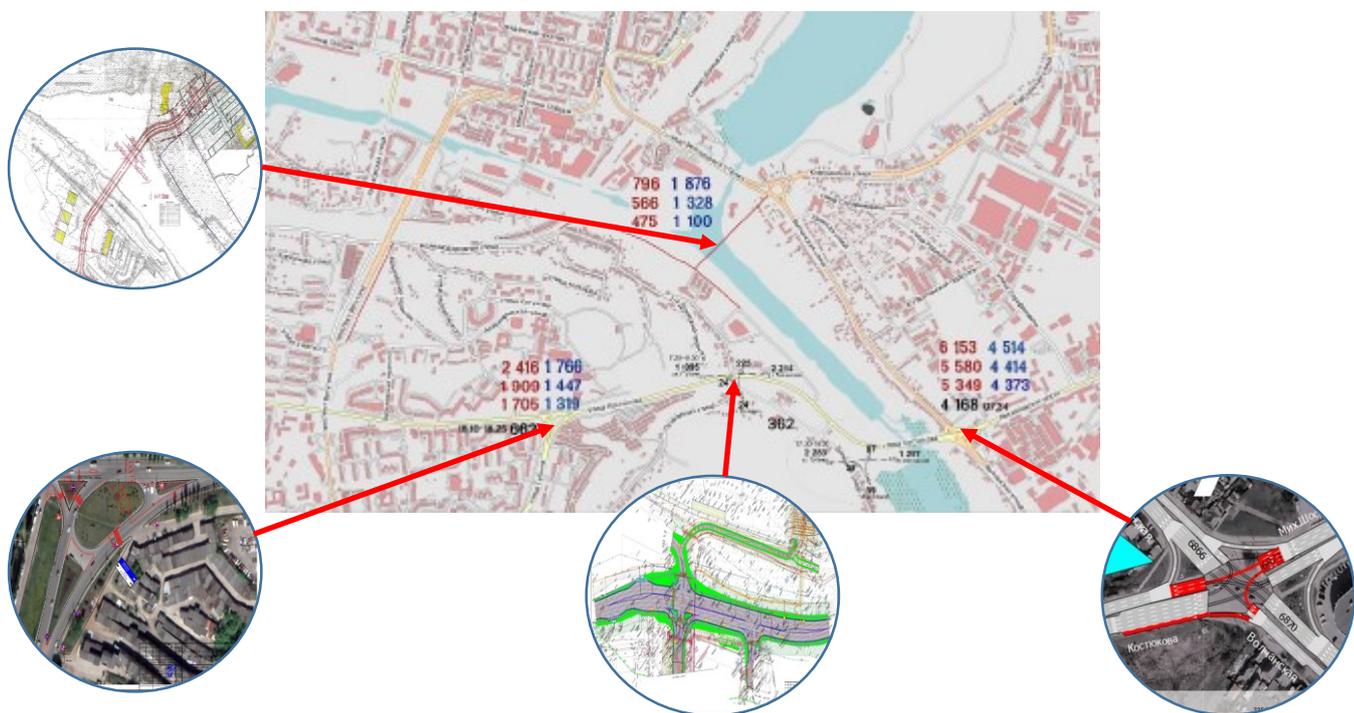


Рис.7. Предложения для улучшения связанности УДС
Разраб. Боровской А.Е.

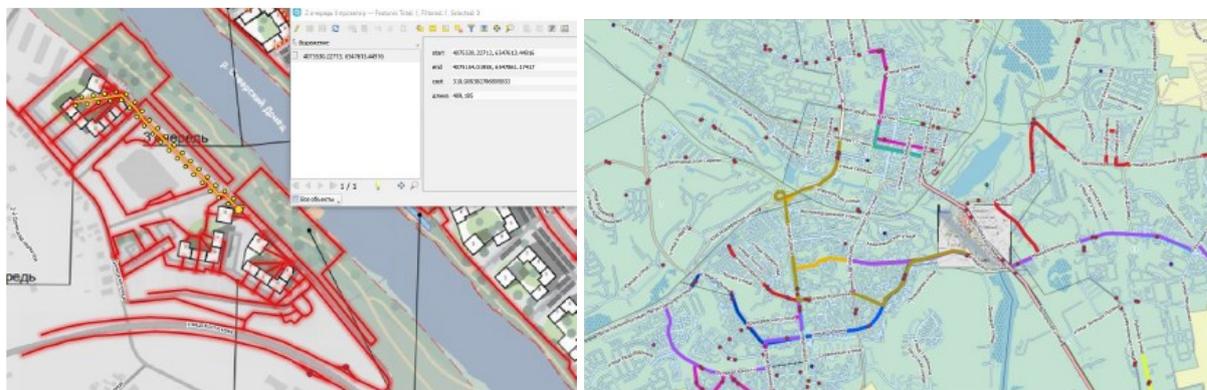


Рис. 8. Оценка доступности общественного транспорта проектируемого микрорайона МКД
Разраб. Боровской А.Е.

Подобный подход позволяет, в случае необходимости переместить существующие или предложить новые остановки общественного

транспорта, а также предусмотреть изменение существующих маршрутов или внедрение новых.

Таким образом, разработана методика экспресс анализа влияния возводимых ОКС на прилегающие участки УДС, которая предполагает:

1. Оценка мастер-плана/генерального плана по количеству жителей и количеству квартир.
2. Расчёт функционирования парковочного пространства МКД.
3. Разбивка исследуемой территории на транспортные зоны.
4. Определение количества рабочих мест и его процентное соотношение от общего количества по городу.
5. Определение геометрических центров транспортных зон и проектируемого ОКС, их соединение кратчайшими расстояниями при помощи анализа в ГИС (в данном случае из ГИС ЦОДД Белгородской агломерации).
6. Расчёт матрицы транспортного взаимодействия между кварталами и транспортными зонами (расчёт существующей и перспективной нагрузки на УДС).

7. Оценка доступности общественного транспорта проектируемого микрорайона МКД.

Предложенная методика апробирована в городе Белгороде на примере жилого комплекса ул. Донецкая – ул. Волчанская, разрабатываемого ООО СЗ "УК ЖБК-1". Результаты показали существующую и перспективную нагрузку на прилегающие участки УДС города, а также позволила оценить комплексное транспортное обслуживание конкретного возводимого объекта ОКС.

Однако в дальнейшем следует проработать вопрос определения точности данных моделей, а это возможно только при контроле характеристик ТП во вновь построенных микрорайонах МКД. Данная работа ведется в г. Белгороде при помощи, внедряемой ИТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blinkin M., Koncheva E. Transport Systems of Russian Cities: Ongoing Transformations. Cham, Switzerland: Springer // Transportation Research, Economics and Policy. Karlsruhe, Germany. 2016. 306 p.
2. Banister D. Transport Planning // Faculty of Technology, Policy and Management. Delft University of Technology. The Netherlands. EJTIR. 2004. No. 4. Pp. 441–444.
3. Боровской А.Е., Новиков И.А., Шевцова А.Г. Внедрение интеллектуальных транспортных систем в рамках национальных программ повышения безопасности дорожного движения // Вестник ХНАДУ. Белгород. 2013. № 61–62. С. 279–283.

4. Геоинформационные системы (ГИС) // [Электронный ресурс]. URL: <https://nextgis.ru> (дата обращения: 21.04.2024).

5. Постолит А.В. Автоматизация сбора первичных данных для формирования матрицы корреспонденций поездок пассажиров на основе компьютерного зрения и нейросетевых технологий // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 2 (93). С. 32–40. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-2-5

6. Рыжкин П.П., Лысенко А.С., Гребенников М.В. Создание графа дорог // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Белгород, 2023. С. 420–424.

7. Решение Белгородского городского совета от 30 января 2018 года № 608 «Об утверждении Программы комплексного развития транспортной инфраструктуры городского округа «Город Белгород» на 2018-2025 года» // Совет депутатов города Белгорода. 2008. Белгород.

8. Боровской А.Е. Новописный Е.А. Яблонская М.Ю. Анализ проекта реконструкции улично-дорожной сети на основе использования динамических матриц транспортных корреспонденций // Всероссийский институт научной и технической информации РАН (Москва). 2015. №10. С. 31–36.

9. Порядок «Определения субъектов Российской Федерации для реализации мероприятия по обновлению подвижного состава наземного общественного пассажирского транспорта в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги»» // Заседание проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 19 ноября 2019 г. №8.

10. Перькова А.Ю., Иванькина Н.А., Смирнов К.Л. Оптимизация транспортного сообщения Белгородской субурбии // Журнал технической эстетики и дизайн – исследования. 2021. №1. С. 61–71. DOI:10.34031/2687-0878-2021-3-1-61-71

11. Боровской А.Е., Гребенников М.В., Савина М.Д. Оценка перемещения населения с помощью ГИС систем // В сборнике: Научно-технические технологии и инновации (XXIV научные чтения). Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород, 2021. С. 351–353.

12. Перькова М.В., Перькова А.Ю., Бик О.В. Влияние градостроительной политики на развитие транспортной инфраструктуры Белгородской субурбии // Журнал архитектура и строительство России. 2021. №3. С. 58–65.

13. Перькова А.Ю., Перькова М.В., Ладик Е.И. Формирование и развитие городских агломераций. Зарубежный и отечественный отпуск // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №8. С. 71–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-71-84

14. Методические рекомендации по совместному использованию парковочных мест для объектов капитального строительства различного функционального назначения // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Москва. 2017

15. Перькова М.В., Иванькина Н.А. Совершенствование транспортной инфраструктуры первого пояса Белгородской агломерации по методологии Нового урбанизма. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 109 с.

16. Перькова А.Ю., Смирнов К.Л. Рекомендации совершенствования транспортной инфраструктуры Белгородской городской агломерации // Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2021. С. 2306–2311.

17. Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под научн. ред. М. Блинкина. М.: Территория будущего, 2011. 576 с.

18. Разработка интеллектуальных транспортных систем: мониторинга, анализа и прогнозирования транспортных потоков [Электронный ресурс]. URL: <https://techincity.ru/> (дата обращения: 23.04.2024).

19. СП 396.1325800.2018 Свод правил. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного планирования.

20. Приказ Управления архитектуры и градостроительства Белгородской области от 6 марта 2023 г. «О внесении изменений в правила

землепользования и застройки городского округа «Город Белгород» Белгородской области» // Администрация губернатора Белгородской области. 2023.

21. Морозов Д.Ю. Разработка методики построения качественных матриц корреспонденций для решения задач управления транспортными потоками: дисс. канд. техн. наук: 05.22.08. Москва, 2020 г. 197 с.

22. Информационно-аналитическая система «Динамика умного города» // [Электронный ресурс]. URL: <http://dsc.infonet.ai> (дата обращения: 15.05.2024).

23. Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 1 октября 2010 г. № 464 «Об утверждении порядка создания, обновления, использования, хранения и распространения цифровых навигационных карт» Зарегистрировано в Минюсте РФ 08.10.2000. №18895.

24. Концепция внедрения интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях [Электронный ресурс]. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/upravlenie-regionalnogo-razvitiya-i-realizacii-nacionalnogo-proekta/rabochaya-gruppa-po-vnedreniyu-its-na-dorozhnoj-seti-subektov-rossijskoj-federacii/301481> (дата обращения: 21.04.2024).

25. Постановление Администрации города Белгорода от 30 января 2020 года №8 «Об утверждении комплексной схемы организации дорожного движения на территории городского округа «Город Белгород» на период до 2035 года // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561716399> (дата обращения: 01.06.2024).

Информация об авторах

Боровской Алексей Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта. E-mail: a.e.borovskoy@gmail.com Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Смирнова Александра Юрьевна, главный специалист отдела подготовки материалов по нарушениям правил остановки и стоянки. E-mail: alex.perkova2000@mail.ru. Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Городской центр управления парковками Санкт-Петербурга». Россия, 191144, Санкт-Петербург г., Моисеенко ул., д. 22, литера 3.

Бердников Максим Николаевич, аналитик департамента управления тарифами и загрузкой. E-mail: pegas9670@gmail.com. ПАО "Авиакомпания "ЮТэйр". Россия, 628011, Ханты-мансийский Автономный Округ - Югра, г. о. Ханты-Мансийск, г Ханты-Мансийск, ул. Мира, зд. 142.

Поступила 26.10.2024 г.

© Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Бердников М.Н., 2025

¹*Borovskoy A.E.,* ²*Smirnova A.Y.,* ³*Berdnikov M.N.*

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

²*Petersburg State Treasury Institution "City Parking Management Center"*

³*Public Joint Stock Company UTair Aviation.*

**E-mail: alex.perkova2000@mail.ru*

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR RAPID ANALYSIS OF THE IMPACT OF NEW OXS BEING BUILT ON ADJACENT AREAS OF MAC

Abstract. Architectural and planning organization of the city, architectural and construction design of new capital construction projects (CCP) are inextricably linked to the functioning of the city transport system as a whole and certain adjacent section of the street and road network (SRN). Designing new neighborhoods/micro-districts it is necessary to assess in advance the projected load on the UDS; sufficient number and functioning of parking spaces on the territory of the erected OCS; accessibility of public transport. It is the comprehensive assessment of the site allocated for the construction of a new OCS that will allow organizing a convenient and favorable environment for its residents and the city as a whole. This study was conducted using the NextGIS QGIS geoinformation system tool with the data taken from the survey of cellular operators of InfoNet Mobil LLC, as well as the master plan of the development with technical and economic indicators. The proposed method of express analysis of the impact of the erected OCS on the adjacent areas of the UDS, allows to calculate the matrix of transport interaction between neighborhoods and transport zones of the city (calculation of the existing and projected load on the UDS), to calculate the functioning of the transport space of the ICD and to estimate the projected integrated transport service of a particular erected OCS. The methodology has been tested in the city of Belgorod on the example of the residential complex Donetskaya St. - Volchanskaya St., developed by LLC NW "UK ZHBK-1". The results showed the need to develop new transport corridors to ensure the connectivity of the neighborhood with other transport zones of the city, to reduce congestion and travel time for residents of newly constructed OCS.

Keywords: geographic information systems (GIS), intelligent transport system (ITS), macromodel, meso-model, capital construction facility (ACS), correspondence Matrix (CM), transport zoning, master plan, road network (UDS).

REFERENCES

1. Blinkin M., Koncheva E. Transport Systems of Russian Cities: Ongoing Transformations. Cham, Switzerland: Springer. Transportation Research, Economics and Policy. Karlsruhe, Germany, 2016. 306 p.
2. David Banister. Transport Planning. Faculty of Technology, Policy and Management. Delft University of Technology. The Netherlands. EJTIR. 2004. No. 4. 2004. Pp. 441–444.
3. Borovskoy A.E., Novikov I.A., Shevtsova A.G. [Introduction of intelligent transport systems within the framework of national programs to improve road safety]. Vestnik KHNADU, Belgorod. 2013. 5 p. (rus)
4. Geographic Information Systems (GIS). Entered into action 21.04.2024.
5. Postolit A.V. [Automation of primary data collection to form a matrix of passenger travel correspondence based on computer vision and neural network technologies]. World of Transport. 2021. Vol. 19. No. 2 (93). Pp. 32–40. DOI:10.30932/1992-3252-2021-19-2-5 EDN: HJLAUF (rus)
6. Ryzhkin P.P., Lysenko A.S., Grebennikov M.V. [Creation of a graph of roads]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov. Belgorod, 2023. Pp. 420–424. (rus)
7. Decision of the Belgorod City Council of January 30. 2018. No. 608 [On approval of the Program for the integrated development of transport infrastructure of the city district City of Belgorod "for 2018-2025 "]. Council of Deputies of the city of Belgorod. 2008. Belgorod. (rus)
8. Borovskoy A.E. Novopisny E.A. Yablovskaya M.Yu. [Analysis of the road network reconstruction project based on the use of dynamic transport correspondence matrices]. All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences (Moscow). 2015. No.10. Pp. 31–36. (rus)
9. Procedure [Determination of the constituent entities of the Russian Federation for the implementation of measures to update the rolling stock of ground public passenger transport within the framework of the federal project" System-wide measures for the development of the road economy of the national project "Safe and high-quality highways "]. Meeting of the project committee on the national project" Safe and high-quality highways "dated November 19. 2019. No. 8. (rus)
10. Perkova A.Yu., Ivankina N.A., Smirnov K.L. [Optimization of transport links of the Belgorod suburb]. Journal technical aesthetics and design - research. 2021. No. 1. Pp. 61–71. DOI:10.34031/2687-0878-2021-3-1-61-71. (rus)
11. Borovskoy A.E., Grebennikov M.V., Savina M.D. [Assessment of population movement using

GIS systems]. In the collection: High-tech technologies and innovations (XXIV scientific readings). Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference. Belgorod, 2021. Pp. 351-353. (rus)

12. Perkova M.V., Perkova A.Yu., Bik O.V. [Influence of urban planning policy on the development of transport infrastructure of the Belgorod suburb]. Journal of Architecture and Construction of Russia. 2021. No. 3. Pp. 58–65. (rus)

13. Perkova A.Yu., Perkova M.V., Ladik E.I. [Formation and development of urban agglomerations. Foreign and domestic vacation]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 71–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-71-84 (rus)

14. Guidelines [For the joint use of parking spaces for capital construction projects of various functional purposes]. Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation. Moscow. 2017. (rus)

15. Perkova M.V., Ivankina N.A. [Improving the transport infrastructure of the first belt of the Belgorod agglomeration according to the methodology of New Urbanism. Monograph]. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2018. 109 p. (rus)

16. Perkova A.Yu., Smirnov K.L. [Recommendations for improving the transport infrastructure of the Belgorod city agglomeration]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod. 2021. Pp. 2306–2311. (rus)

17. Vukan R. Vucik. [Transport in cities convenient for life] per. From English A. Kalinina; under scientific. ed. M. Blinkin. M.: Territory of the Future. 2011. 576 p. (rus)

18. Development of intelligent transport systems: [Monitoring, analysis and forecasting of traffic flows]. Entered into action 23.04.2024. (rus)

19. SP 396.1325800.2018 Code of Practice. [Streets and roads of settlements. Town planning rules]. Entered into action 23.04.2024. (rus)

20. Order of the Department of Architecture and Urban Planning of the Belgorod Region dated March 6, 2023 [On Amendments to the Rules for Land Use and Development of the Urban District" City of Belgorod "of the Belgorod Region "]. Administration of the Governor of the Belgorod Region. 2023. (rus)

21. Morozov D.Yu. Development of a methodology for constructing high-quality correspondence matrices for solving traffic management problems [Razrabotka metodiki postroyeniya kachestvennykh matrits korrespondentsiy dlya resheniya zadach upravleniya transportnymi potokami] Diss. Candidate of Technology Sciences: 05.22.08. Moscow. 2020. 197p. (rus)

22. The order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of October 1, 2010 No. 464 "On approval of the procedure for the creation, updating, use, storage and distribution of digital card cards" was registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on October 8, 2000. No. 18895 [Prikaz ekonomicheskogo ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii ot 1 oktyabrya 2010 g. № 464 «Ob utverzhdenii por-yadka sozdaniya, obnovleniya, ispol'zovaniya, khraneniya i rasprostraneniya tsifrovyykh kartochnyykh kart» zaregistrovano v Minyuste RF 08.10.2000. №18895.] (rus)

24. The concept of implementing intelligent transport systems in urban agglomerations. Entered into action 21.04.2024.

25. Resolution of the Administration of the city of Belgorod dated January 30. 2020. No. 8. [On approval of a comprehensive traffic management scheme in the territory of the city district" City of Belgorod "for the period up to 2035]. Entered into action 01.06.2024.

Information about the authors

Borovskoy, Aleksey E. Assistant Professor. E-mail: a.e.borovskoy@gmail.com. Belgorod State Technological University. V. G. Shukhova, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Smirnova, Alexandra Yu. Chief specialist. E-mail: alex.perkova2000@mail.ru. St. Petersburg State Institution "City Parking Management Center of St. Petersburg". Russia, 191144, St. Petersburg, Moiseenko Street, 22, lit. 3.

Berdnikov, Maksim N. Analyst. E-mail: pegas9670@gmail.com. Russia, 628011, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra, Khanty-Mansiysk, Khanty-Mansiysk, Mir str. 142.

Received 26.10.2024

Для цитирования:

Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Бердников М.Н. Разработка методики экспресс анализа влияния вновь возводимых объектов капитального строительства на прилегающие участки УДС // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 83–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-83-93

For citation:

Borovskoy A.E., Smirnova A.Y., Berdnikov M.N. Development of a method for rapid analysis of the impact of new oxs being built on adjacent areas of MAC. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 83–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-83-93

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-94-103

Тарасенко В.Н., Юшин Д.Н., Денисова Ю.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: tarasenko.vn@bstu.ru*

ФОРМИРОВАНИЕ КОМФОРТНОГО СРЕДОВОГО ПРОСТРАНСТВА С УЧЕТОМ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Аннотация: *Формирование средового пространства учебной аудитории заключается в реализации требований, предъявляемых к комфортным факторам пребывания, среди которых наравне с температурой внутреннего воздуха, влажностью и скоростью перемещения воздушных потоков следует оценивать и освещение искусственным и естественным светом, а также варианты размещения источников искусственного освещения с учетом разряда зрительной работы в помещении, эргономику и дизайн мебели и интерьеров.*

Рассмотрены основные принципы формирования рабочего пространства без избыточного освещения с учетом функции помещения, осуществляется варьирование свойств и вида осветительных приборов, что позволяет более детально рассмотреть получаемые световые поля и расположить осветительные приборы с учетом расстановки мебели и обучающих приборов.

Формирование комфортного средового пространства с учетом функционального назначения помещения позволяет уделять особое внимание освещению, в том числе искусственному, и регламентировать использование тех или иных осветительных приборов в учебных заведениях с учетом яркости, особенностей распределения светового потока на горизонтальной поверхности.

Решения по выбору цветовых сочетаний и материалов отделки помещений так же важны в формировании образа восприятия помещения, и наделяют его запоминающимся образом, который потом работает на узнавание аудитории и позволяет сделать ее дизайн достаточно индивидуальным и запоминающимся.

Ключевые слова: *комфортность пребывания, дизайн, световой комфорт, световой поток, световое поле, освещенность, искусственный свет.*

Введение. Показатели комфорта чаще всего регламентируются с учетом типа здания, режима эксплуатации и назначения здания и помещения в нем. Несомненно, регламентируемые показатели, такие как температура в помещении, влажность, скорость перемещения воздушных потоков, освещение естественным и искусственным светом уточняют те минимальные необходимые требования, необходимые для обеспечения комфортного режима пребывания в помещении. Несомненно, понятие комфортности пребывания в помещении, гораздо шире и индивидуальнее, чем типовые факторы, нормируемые на сегодняшний день.

И индивидуальным показателям комфорта относят интенсивность жизнедеятельности, то есть насколько интенсивно человек будет взаимодействовать в пространстве помещения: отдыхать и насколько активно он будет это делать, работать, режим работы тоже важен; так же следует учитывать предположительное время пребывания в помещении и конечно, возрастные особенности человека. Индивидуальность подходов даже в выборе температурного режима в помещении позволяет предположить, что понятие комфортности нахождения в помещении гораздо шире, чем регламентируемые показатели.

Особый подход к назначению и оценке базовых показателей комфорта характерен для общественных зданий, в том числе, для Высших учебных заведений, где существует отдельное нормирование для помещений различного назначения лабораторного и учебного фонда по таким показателям, как температура внутреннего пространства, освещенность, звукоизоляция, запыленность и так далее.

Освещение, как один из основных факторов комфортности длительного пребывания в аудитории, оценивается наряду с остальными параметрами организации рабочего пространства и является одним их основополагающих для выполнения обучающей функции в аудиторном фонде Высшего учебного заведения [1, 2]. Несомненно, естественное освещение должно присутствовать в аудитории, если это не противоречит ее функции, и учитывается в воздействии на глаза студентов в рамках процесса обучения. Искусственное освещение при этом является прекрасным дополнением к продолжению светового дня и формирует основные условия комфортности [3, 4]. Однако, расположение осветительных приборов не должно быть статичным, следует учитывать местоположение рабочих мест, высоту условной рабочей поверхности, разряд зрительной работы, а также яркость, мощность и цветоотдачу осветительных приборов, диапазон

мерцания. Поэтому создание дизайн-проекта аудитории перед реорганизацией учебного пространства должно включать наряду с оценкой эргономики в подборе мебели и оборудования, выборе цветового решения интерьеров и раскладку осветительных приборов с оценкой возможных световых полей и бликовых областей на достаточность освещения в целом, перепады освещения и его равномерность в рабочем поле [5].

Методика, оборудование, материалы.

Оценка световых полей в проектировании искусственного освещения является достаточно сложной и интересной областью исследований. Оценка интенсивности и равномерности искусственного освещения должна выполняться на этапе проектирования аудитории с учетом функционального назначения. Немаловажным фактором также является разряд и продолжительность зрительной работы, величина объекта различения, от этого зависит необходимая минимальная освещенность рабочей поверхности. Таким образом, для каждого помещения, исходя из его функционального назначения, существует нормирование показателей освещения минимального и максимального показателей освещения, должен рассчитываться коэффициент однородности светового поля, должны быть учтены коэффициенты светотражения поверхностей интерьера, удовлетворяющий требованиям зрительного комфорта [1, 5].

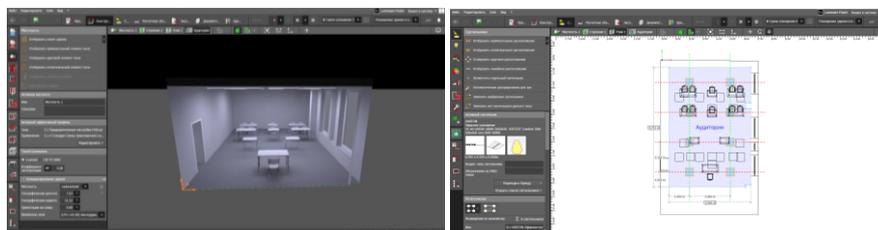


Рис. 1. Информационная модель аудитории в интерфейсе DIALux evo

Основная часть. Для создания комфортного освещения в учебных учреждениях рекомендуется использовать люминесцентные или галогенные лампы [11 - 13], так как они дают максимально приближенный к дневному свету поток освещения, распределяемый мягко и не раздражающий зрительный анализатор. Исходя из доступности для закупки в Белгороде подобраны светильники, встраиваемые в подвесную потолочную систему, типа «Armstrong» со светодиодными лампами различной мощности и обладающие разным рассеивающим эффектом. Производитель предоставляет полные фотометрические данные, подходящие для использования в ПО. Полные технические характеристики приборов, для которых выполнялся расчет, приведены в табл. 1.

В данной статье рассмотрен расчет схемы освещения для аудитории высшего учебного заведения с учетом необходимых характеристик зрительного комфорта. В нормативной базе приведены основные требования для создания комфортной зрительной среды [3]. Для образовательных учреждений Высшего образования необходимая освещенность рабочей поверхности в помещениях аудиторного фонда должна быть не менее 400 лк [3]. Так как меняется назначение помещения и предположительно помимо учебной функции, в помещении будет присутствовать лабораторное оборудование, назначен разряд зрительной работы V с величиной объекта различения до 5 мм и минимальной освещенностью 400 лк [3].

Для расчета предложено использовать программный комплекс DIALux evo, как максимально доступных, свободно распространяемый продукт, позволяющий произвести расчет освещенности для заданного помещения и требуемой точности зрительной работы, попутно назначив высоту условной рабочей поверхности равной высоте стола, определить коэффициенты светотражения элементов интерьера и выбрав осветительные приборы по мощности, световому потоку, интенсивности распространения света и световому потоку [5 - 10]. Для выполнения расчета в программе воссоздана объемная модель аудитории с требуемым оборудованием (рис. 1).

Для определения оптимального размещения светового оборудования относительно рабочих поверхностей, слушателей и преподавателя, предложен расчет для трех сценариев освещения. Такой подход позволяет оптимизировать количество и взаимное расположение светильников, добиться максимальной однородности световых полей и выявить закономерности между мощностью осветительных приборов и площадью, освещаемой достаточно для обеспечения обучающей функции. Результаты расчета для четырех вариантов размещения приборов освещения представлены в табл. 2.

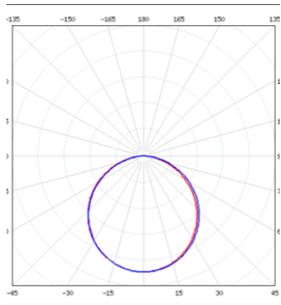
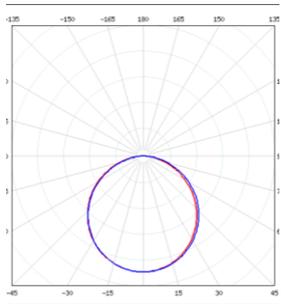
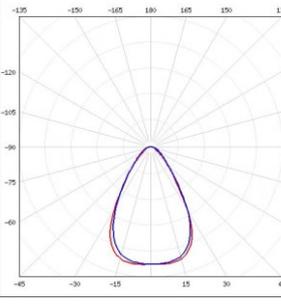
Расчет первого варианта выполнен по сценарию освещения, подобранному программой автоматически на основе общих габаритов помещения и требуемой освещенности на плоскости, расположенной на высоте 0,8 м от поверхности

пола. Аналогично предложен вариант раскладки осветительных приборов номер четыре, отличающийся по размещению того же количества светильников, но по длине аудитории. Варианты

второй и третий предложены с уменьшением количества осветительных приборов до шести, варианты раскладки предложены авторские с учетом расположения рабочих мест обучающихся.

Таблица 1

Технические характеристики предлагаемых к монтажу осветительных приборов (габаритные размеры для удобства монтажа выбраны 590 × 590 × 69 мм)

Характеристики осветительных приборов	Тип А	Тип Б	Тип В
Артикул	B1-A0-00070-01G02-2006040	B1-A0-00070-01G02-2003450	V1-A0-O0558-10000-2003040
Внешний вид			
Тип рассеивателя	Рассеиватель из опалового ПММА с сотовыми призматическими преломляющими элементами	Рассеиватель из опалового ПММА с сотовыми призматическими преломляющими элементами	—
Номинальная потребляемая электрическая мощность, Вт	54	30	30
Номинальный световой поток, лм	6300	3510	3000
Кривая силы света			

Второй вариант раскладки осветительных приборов предполагает, что схема освещения создана посредством ручной корректировки автоматической расстановки (6 осветительных приборов), что позволило улучшить результат расчета.

Результат расчета показывает большую однородность светового поля, чем в первом случае, но, тем не менее, расположение светильников не оптимально относительно рабочих мест, что создает зоны повышенной освещенности в проходах между рабочими поверхностями, а также на средних местах, что может вызвать дискомфорт у учащихся.

Третий сценарий освещения создан полностью вручную согласно расположения рабочих поверхностей и необходимой освещенности. Расположение осветительных приборов (6 шт.) с учетом максимального освещения посадочных

мест позволило достичь наиболее эффективного освещения при меньших затратах на закупку, однако равномерность освещения при этом достигала только 0,36, что значительно меньше нормируемых значений и говорит о резких перепадах видимости элементов на рабочей поверхности.

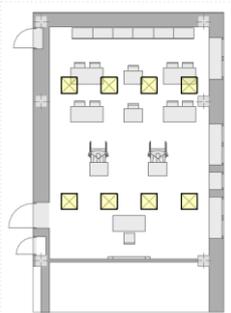
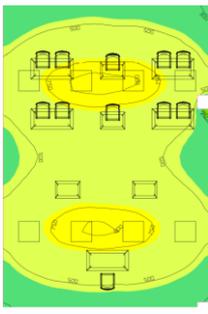
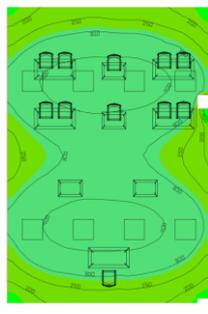
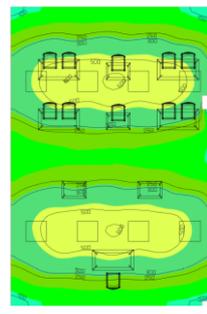
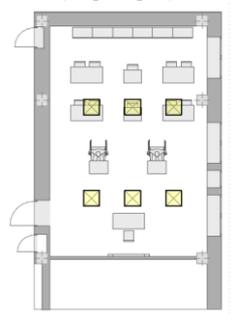
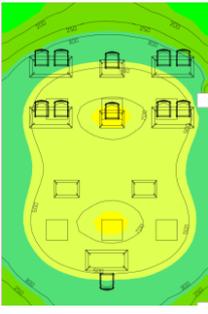
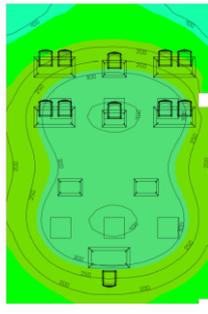
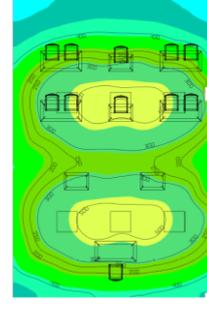
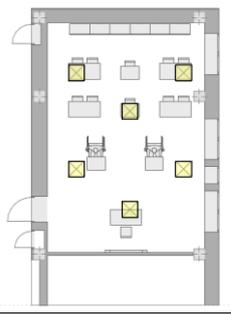
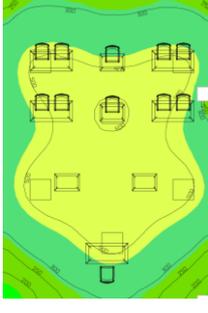
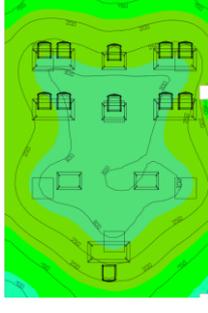
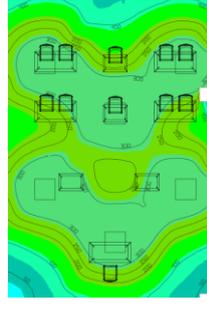
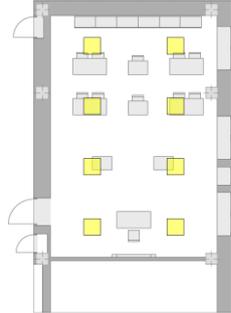
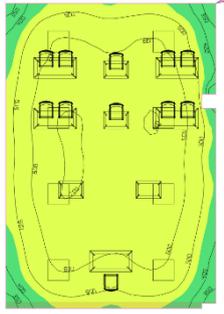
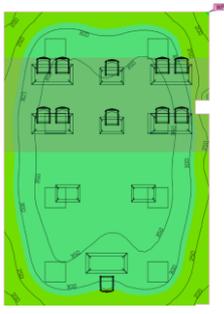
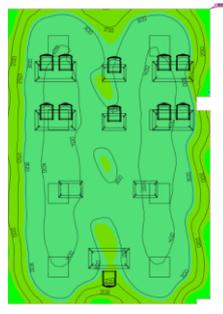
Четвертая схема является самой простой и логичной в исполнении и при ее оценке было доказано, что при хорошей равномерности до 0,53 среднее значение освещенности выше нормируемого и составляет 579 лк, что соответствует заявленным в нормативной литературе требованиям по нормированию освещенности полностью [3] (табл. 3).

Чтобы подтвердить релевантность использования светильников заданной мощности был произведен расчет для вариантов раскладки со светильниками меньшей мощности, 30 Вт вместо 54 Вт. Полученные схемы освещения позволили

сделать вывод о том, что использование светильников меньшей мощности не удовлетворяет требованиям освещенности рабочих поверхностей (тип Б осветительного прибора в таблице 2).

Таблица 2

Изолинии световых полей, полученных в результате варьирования раскладки и мощности осветительных приборов в потолочной системе аудитории

Типовые схемы раскладки осветительных приборов в потолочной системе	Изолинии освещенности, построенные для осветительных приборов различного типа		
	Тип А (прибор В1-А0-00070-01G02-2006040 мощностью 54 Вт)	Тип Б (прибор В1-А0-00070-01G02-2003450 мощностью 30 Вт)	Тип В (прибор V1-А0-00558-10000-2003040 мощностью 30 Вт)
<p>СХЕМА РАСКЛАДКИ 1 (8 приборов)</p> 			
<p>СХЕМА РАСКЛАДКИ 2 (6 приборов)</p> 			
<p>СХЕМА РАСКЛАДКИ 3 (6 приборов)</p> 			
<p>СХЕМА РАСКЛАДКИ 4 (8 приборов)</p> 			

Оценивая те же варианты раскладки осветительных приборов меньшей мощности было установлено, что коэффициент равномерности освещения резко снижается во всех вариантах и

достигает 0,18 и 0,26 для первой и четвертой схем раскладки соответственно, что почти в два раза хуже ожидаемого нормируемого коэффициента равномерности освещения (табл. 3).

Таблица 3

Результаты оценки полей освещенности, полученных в результате виртуального размещения приборов типа А мощностью 54 В (в числителе) и типа В мощностью 30 В (в знаменателе)

Схема раскладки осветительных приборов типов А и В	Значение освещенности горизонтальной рабочей поверхности, лк			Коэффициент равномерности распределения освещения (не менее 0,5)
	Среднее (не менее 400 лк)	минимальное	максимальное	
СХЕМА РАСКЛАДКИ 1 (8 приборов)	581	242	815	0,42
	327	58,7	615	0,18
СХЕМА РАСКЛАДКИ 2 (6 приборов)	467	139	743	0,29
	262	29,2	567	0,11
СХЕМА РАСКЛАДКИ 3 (6 приборов)	439	156	615	0,36
	247	38,1	398	0,15
СХЕМА РАСКЛАДКИ 4 (8 приборов)	579	309	707	0,53
	330	84,3	453	0,26

Таким образом, конечным вариантом раскладки светильников рекомендован вариант 4 со светильниками, изучающими световой поток 6300 лм мощность 50 Вт. Такая схема расстановки осветительных приборов создаст наиболее комфортную среду для зрительного восприятия, позволяя при среднем значении освещенности, незначительно превышающем нормативную величину в 400 лк получить равномерное распределение на всей рабочей плоскости с коэффициентом 0,53, что достаточно важно для выполнения трудовых операций в учебном заведении.

Размещение осветительных приборов влияет на длительность и комфорт пребывания, а также работоспособность обучающихся не меньше, чем общее цветовое решение интерьеров [14, 15]. Выбор фактур и общих цветовых решений интерьеров позволяют сформировать положительный эмоциональный фон, а некие акценты в цветовых решениях настраивают на рабочий лад и позволяют не отвлекаться, а мягко бессознательно настраивают на продуктивный процесс познания и творчества. Фактуры поверхностей и их цвет и гладкость вносят свой вклад в формирования областей бликования или блескости, то есть участвуют в формировании светового климата помещения. Поэтому в реализации дизайн - проекта следует учитывать не только цвет, но и фактуру поверхностей мебели и других элементов интерьера [16–20].

Несколько вариантов эскизных предложений предложено в рамках реконструкции одной из учебных аудиторий БГТУ им. В.Г. Шухова (рис. 2, 3).

Особое внимание при формировании предложений для дизайн – проекта следует уделять не только выбору фактур поверхностей или типам отделки помещения, но гармоничному образу аудитории в целом, то есть цветовому решению. Выбор цветового решения является важным, и должен быть не только гармоничным, но и создавать свой неповторимый запоминающийся образ, который в ассоциативном ряду выделял бы данную аудиторию и мысленно закреплял за ней определенную функцию.

Учитывая новое функциональное назначение, связанное с проведением исследовательских и лабораторных работ по акустическому благоустройству и физическим явлениям в толще ограждения, было предложено несколько вариантов цветовых решений: серо-зеленая гамма (рис. 2) и серо-бежевый вариант (рис. 3).

Светло – серый оттенок стен выбран не случайно – это цвет спокойствия, свободы и легкости, придает интерьеру уверенно спокойное состояние и ощущение недосказанности и наполненности в то же время. В прокраске стен присутствуют динамичные линии, призванные добавить узнаваемости и, в то же время, побудительного действия, интереса к происходящему в аудитории. Гармоничное сочетание светлых оттенков серого и зеленого дают чувство комфорта, спокойствия, уверенности, и, в то же время, побуждают к размышлениям над происходящим в аудитории (рис. 2).

Второй вариант эскизного предложения (рис. 3) предполагает отсутствие динамичных элементов. Им на смену приходят доминанты по

контрасту: полы и часть элементов интерьера выполнены в темно серых тонах, что, несомненно, позволяет заострить внимание на деталях. Полы

в этом варианте эскизного предложения выполнены из влагостойкого ламината с фактурой под дерево темного серого цвета.

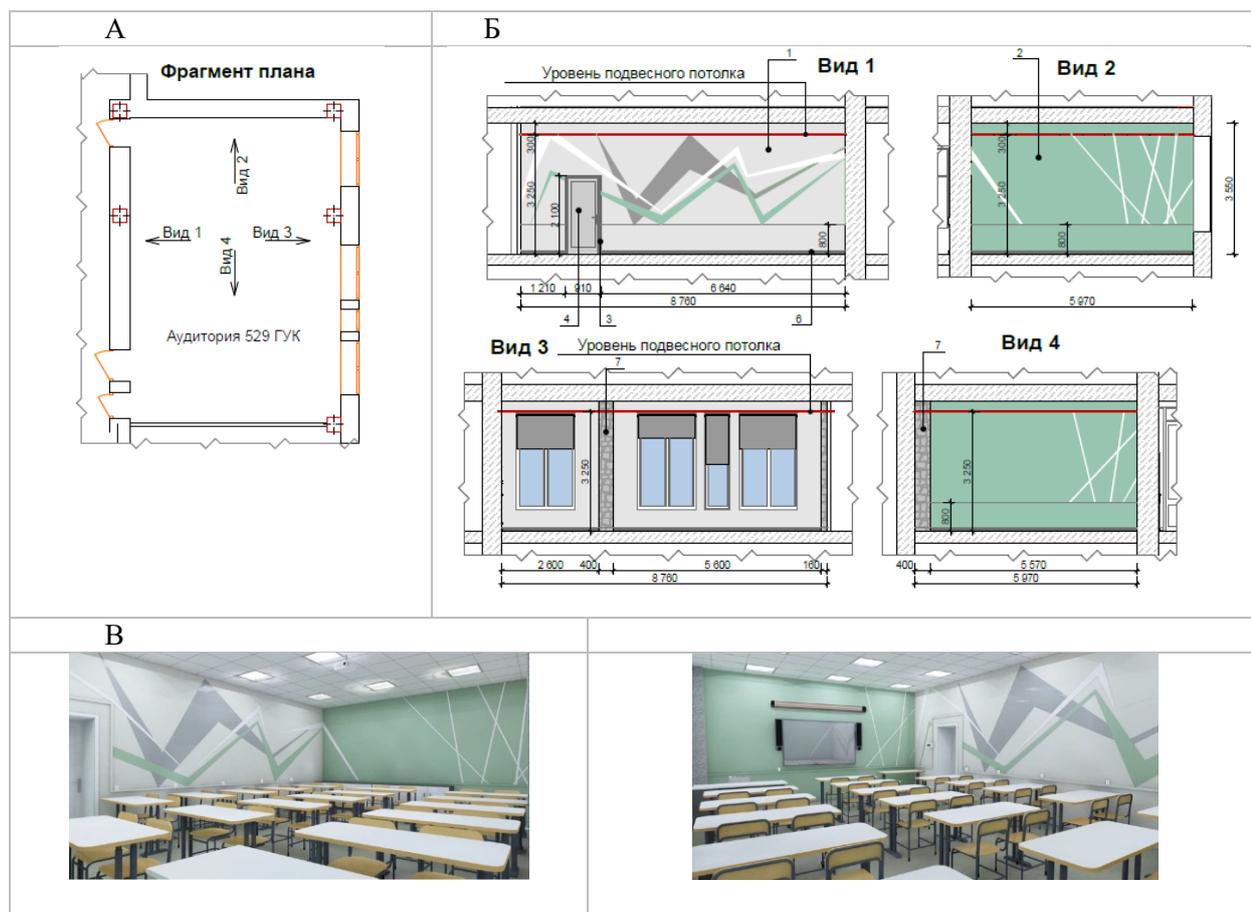


Рис. 2. Вариант эскизного предложения с акцентным исполнением окрашивания торцовых стен: А – план аудитории; Б – развертки стен с выкрасками; В – вариант исполнения интерьерного решения

Фактура древесины повторяется в элементах интерьера: мебели и шкафчиках для оборудования и приборах. Элементы интерьера выполняются в светлых тонах, предпочтительно бежевого оттенка. Такие цвета парт и стульев максимально позволяют сознанию отвлечься от созерцания и сосредоточиться на обучении. Эргономика мебели учитывала возможности использования для людей с ограниченными возможностями по движению. Безбарьерная среда в ВУЗе является важным проблемным вопросом, который обязательно следует учитывать при выборе мебели и ее расстановке в учебной аудитории. Для осуществления мероприятий по доступности для маломобильных групп населения в эскизном предложении было принято решение об изменении ширины дверного проема и расстановке мебели таким образом, чтобы дать возможность беспрепятственно двигаться по аудитории людям на колясках, занимать удобные посадочные места. возможно размещение в парной рассадке или в индивидуальном порядке по желанию обучающихся. Выбор каждого обучающего в организа-

ции личного и обучающего пространства в данном дизайн- проекте учтен максимально полно с использованием парт одинарной и двойной рассадки повышенной комфортности. Парты – трансформеры позволяют решать поставленные учебные задачи с организацией типовых или открытых учебных пространств, что очень важно в формировании учебных навыков и лабораторно-исследовательского подхода в учебной функции. Рабочее пространство при этом становится более статичным и позволяет сосредоточиться на обучающей или исследовательской функции, закрепленной за аудиторией.

Наличие статичной поверхности одного цвета и без фактуры на торцовой стене позволяет сделать обучающую функцию более развернутой и демонстрировать наглядный материал в соответствии с тематикой на данной поверхности, меняя слайды или статичные изображения в соответствии с тематикой.

Второй вариант нашел отклик в финальном эскизном проекте реорганизации пространства учебной аудитории с перепрофилированием ее в учебно-исследовательскую лабораторию.

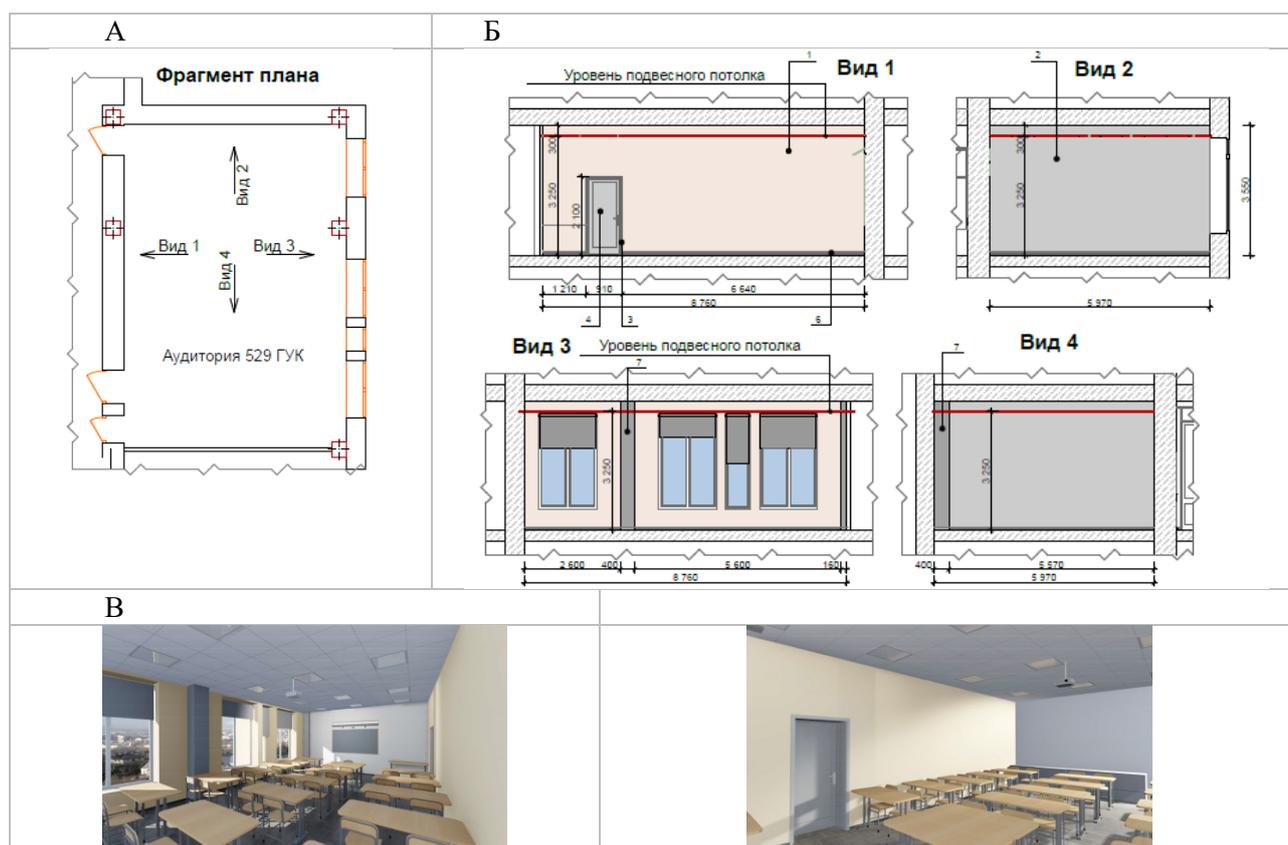


Рис. 3. Второй вариант эскизного предложения:
 А – план аудитории; Б – развертки стен с указанием используемых цветов;
 В – вариант исполнения интерьерного решения

Выводы.

Оценка проекта размещения осветительных приборов в рамках эскизного предложения позволила рассмотреть ряд вариантов с использованием базовых осветительных, встраиваемых в Армстронг - потолочные системы, приборов. Было выявлено необходимое и достаточное количество осветительных приборов, их мощность, световой поток и температура свечения, оценивались изолинии световых полей, полученных при разных раскладках осветительных приборов, получены коэффициенты равномерности освещения на рабочей поверхности в аудитории и даны рекомендации по использованию и мощности, типу и варианту раскладки осветительных приборов.

Варианты эскизного предложению учитывали раскладку осветительных приборов и призваны были выявить один из лучших вариантов исполнения интерьера, позволяющий помимо собственно обучающей функции закрепить за аудиторией неповторимый облик и узнаваемость.

Помимо базовых функций, реализованных в помещении, учитывалась возможность ее вариативного использования для лабораторно-исследовательских работ и обучающей функции. Интерактивная мобильность предусматривает не

только трансформацию парт и расширение и реорганизацию внутреннего пространства но и возможности демонстрации обучающих материалов на стену как планшетов, на интерактивную доску с возможностью наглядного использования материала и в индивидуальные устройства каждого студента по необходимости

Безбарьерная среда предполагает реализацию возможностей для каждого студента, с индивидуальными особенностями в движении, в том числе. Способность комплексно подходить к реализации учебного процесса, в том числе, и с учетом требований и возможностей контингента позволяет осуществлять обучающую функцию наиболее полно и последовательно.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» (№ А-5/22, тема проекта: Разработка концепции современной перепланировки и реконструкции университетских кампусов с учетом реновации единой инфраструктуры) на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черныш Н.Д., Тарасенко В.Н. Микроклимат селитебной территории как многокомпонентная среда архитектурно-строительного проектирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 57–61.
2. Тарасенко В.Н., Денисова Ю.В. Эргономика как основа дизайна учебной аудитории // Молодежь и научно-технический прогресс. Сборник докладов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 2-х томах. Губкин – Старый Оскол: Ассистент плюс. 2023. С. 564–567.
3. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (с изменениями на 28 декабря 2021 года). М., Минстрой России. 2022. 188 с.
4. Корнев А.С., Бушлякова Л.В. Проектирование искусственного освещения на примере офисного помещения с помощью программного пакета DIALux // Инновационные технологии и технические средства для АПК. Сборник докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. 2015. С. 188–193.
5. Lesovik R.V., Botsman L.N., Tarasenko V.N. Enhancement of Sound Insulation of Lightweight Concrete Based on Nanostructured Granular Aggregate // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, No10. 2014. Pp. 1789–1793.
6. Tarasenko V.N., Denisova J.V., Chernysh N.D. Prediction of Sound-Insulating Properties of Cellular Concrete Composites // Digital Technologies in Construction Engineering. Selected Papers. Ser. "Lecture Notes in Civil Engineering". 2022. Pp. 47–52.
7. Tarasenko V.N., Degtev I.A., Chernysh N.D. Acoustic Comfort of a Multipurpose Hall Palace of Culture for University Students of BSTU named after V.G. Shukhov // Wschodnio Europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). 2016. No8. Pp. 132–135.
8. Стахарный С.А. Органические светодиоды - инновационный источник света // Светотехника. М., 2018. С. 71–75.
9. Кузякин Б.Г. Особенности освещения экспозиций в Государственном Эрмитаже // Светотехника. М., 2018. С.10–13.
10. Денисова Н.В., Гибадуллин Р.Р., Копылов А.М. Проектирование осветительных установок с применением автоматизированного программного продукта DIALux: методические указания по выполнению лабораторных работ. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2017. 64 с.
11. Таррел Дж. Свет и пространство [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://gallery2-art.do.am/news/dzhejms_tarrell_svet_i_prostranstvo/2009-12-23-8 (дата обращения: 18.10.2024).
12. Козлов Д.Г., Савицкас Р.К. Светотехника и электротехнологии: учебное пособие. Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2014. 363 с.
13. Козлов Д.Г. Общие тенденции развития светового дизайна средствами LED- технологий // Вестник ВГАУ. 2016. No 2(49). С. 146–154.
14. Адамов О.И., Афолина М.И., Коробейникова А.Е., Привезенцева С.В. Формирование комфортной городской среды [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://lib.mgsu.ru> (дата обращения: 18.10.2024).
15. Thyssen M. Examples of best practice for making EU cities more accessible // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2016. ISBN 978-92-79-55293-9. Pp. 26.
16. Боков А.В. Теория. Город. Среда // Архитектура и строительство России. 2019. No 4 (232). С. 8–15.
17. Krasheninnikov A.V. Urban Development and Built Environment // USA: Open Science Publishing, 2017. 169 pp.
18. Крашенинников А.В. Когнитивные модели городской среды: учебное пособие. М.: КУРС, 2021. 209 с.
19. Лекус Е.Ю., Быстрянцева Н.В. Световая культура города. Часть I. Проблемный подход. СПб: Университет ИТМО, 2018. 123 с.
20. Лекус Е.Ю., Быстрянцева Н.В. Световой дизайн: свет как материал, технология, форма // «Материал – Технология – Форма» как универсальная триада в дизайне, архитектуре, изобразительном и декоративном искусстве. Сборник докладов Международной научной конференции «Строгановские чтения». М.: МГХПА им. С.Г. Строганова, 2018. С. 447–452.

Информация об авторах

Тарасенко Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций, ИСИ. E-mail: vell.30@mail.ru; tarasenko.vn@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Юшин Дмитрий Николаевич, инженер кафедры архитектурных конструкций, ИСИ. E-mail: Yushin.dn@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Денисова Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций, ИСИ. E-mail: denisova.yv@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.11.2024 г.

© Тарасенко В.Н., Юшин Д.Н., Денисова Ю.В., 2025

**Tarasenko V.N., Yushin D.N., Denisova Yu.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: tarasenko.vn@bstu.ru

FORMATION OF A COMFORTABLE ENVIRONMENT TAKING INTO ACCOUNT ARTIFICIAL LIGHTING

Abstract. *The formation of the environmental space in the classroom involves implementing, the requirements for comfortable conditions, including temperature, humidity, and air flow speed. It also includes evaluating options for artificial lighting placement and the ergonomics of furniture and interior design.*

The main principles of creating a workspace without excessive lighting take into account the function of the room and the properties of lighting devices. This allows for a more detailed examination of light fields and arrangement of lights based on furniture and educational equipment.

The formation of a comfortable environment, taking into account the functional purpose of the room, allows paying special attention to lighting, including artificial lighting. It is also possible to regulate the use of certain lighting devices in educational institutions based on brightness and the peculiarities of light distribution on a horizontal surface.

Decisions on the choice of color combinations and interior decoration materials are also important in shaping the image of a room and endowing it with a memorable look, which helps to recognize the audience and make its design quite unique and memorable.

Keywords: *comfort of stay, design, luminous comfort, luminous flux, light field, illumination, artificial light.*

REFERENCES

1. Chernysh N.D., Tarasenko V.N. Microclimate of residential territory as a multicomponent environment of architectural and construction design [Mikroklimat selitebnoj territorii kak mnogokomponentnaya sreda arxitekturno-stroitel'nogo proektirovaniya]. Belgorod: Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 6. Pp. 57–61. (rus)

2. Tarasenko V.N., Denisova Yu.V. Ergonomics as the basis of classroom design [Ergonomika kak osnova dizajna uchebnoj auditorii]. Youth and scientific and technical progress [Molodezh' i nauchno-texnicheskij progress]. Collection of reports of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and young scientists in 2 volumes. Gubkin – Stary Oskol: Asystem plus. 2023. Pp. 564–567. (rus)

3. SP 52.13330.2016 Natural and artificial lighting. Updated version of the SNiP 23-05-95* [Estestvennoe i iskusstvennoe osveshhenie. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 23-05-95]. Moscow, Ministry of Construction of Russia. 2017. 108 p. (rus)

4. Kornev A.S., Bushlyakova L.V. Designing artificial lighting on the example of office space us-

ing the DIALux software package [Proektirovanie iskusstvennogo osveshheniya na primere ofisnogo pomeshheniya s pomoshh'yu programmynogo paketa DIALux]. Innovative technologies and technical means for agriculture [Innovacionny'e texnologii i texnicheskie sredstva dlya APK]. Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and specialists. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. 2015. Pp. 188–193. (rus)

5. Lesovik R.V., Botsman L.N., Tarasenko V.N. Enhancement of Sound Insulation of Lightweight Concrete Based on Nanostructured Granular Aggregate. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. No 10. 2014. Pp. 1789–1793.

6. Tarasenko V.N., Denisova J.V., Chernysh N.D. Prediction of Sound-Insulating Properties of Cellular Concrete Composites. Digital Technologies in Construction Engineering. Selected Papers. Ser. "Lecture Notes in Civil Engineering". 2022. Pp. 47–52.

7. Tarasenko V.N., Degtev I.A., Chernysh N.D. Acoustic Comfort of a Multipurpose Hall Palace of Culture for University Students of BSTU named af-

ter V.G. Shukhov. *Wschodnio Europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2016. No 8. Pp. 132–135.

8. Stakharny S.A. Organic light-emitting diodes - an innovative light source [Organicheskie svetodiody` - innovacionny`j istochnik sveta]. *Lighting engineering [Svetotexnika]*. Moscow, 2018. Pp. 71–75. (rus)

9. Kuzyakin B.G. Features of lighting exhibitions in the State Hermitage Museum [Osobennosti osveshheniya e`kspozicij v Gosudarstvennom E`rmitazhe]. *Lighting engineering [Svetotexnika]*. Moscow, 2018. Pp. 10–13. (rus)

10. Denisova N.V., Gibadullin R.R., Kopylov A.M. Design of lighting installations using the automated software product DIALux [Proektirovanie osvetitel`ny`x ustanovok s primeneniem avtomatizirovannogo programmnoho produkta DIALux]: guidelines for laboratory work. Kazan: Kazan State Energy University. 2017. 64 p. (rus)

11. Turrell J. Light and space [Svet i prostranstvo] [Electronic resource]. Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://gallery2-allart.do.am/news/dzhejms_tarrell_svet_i_prostranstvo/2009-12-23-8 (date of application: 18.10.2024). (rus)

12. Kozlov D.G., Savitskas R.K. Lighting and electrical engineering: studies manual [Svetotexnika i e`lektrotexnologii: uchebnoe posobie] Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2014. 363 Pp. (rus)

13. Kozlov D.G. General trends in the development of lighting design by means of LED technologies [Obshhie tendencii razvitiya svetovogo dizajna sredstvami LED- texnologij]. *Vestnik VGUU*. 2016. No. 2(49). Pp. 146–154. (rus)

14. Adamov O.I., Afonina M.I., Korobeynikova A.E., Priezentsseva S.V. Formation of a comfortable urban environment [Formirovanie komfortnoj gorodskoj sredy`] [Electronic resource]. Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://lib.mgsu.ru> (date of application: 18.10.2024). (rus)

15. Thyssen M. Examples of best practice for making EU cities more accessible. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2016. Pp. 26.

16. Bokov A.V. Theory. City. Environment [Teoriya. Gorod. Sreda]. Architecture and construction of Russia. 2019. No. 4 (232). Pp. 8–15. (rus)

17. Krashennikov A.V. Urban Development and Built Environment. USA: Open Science Publishing, 2017. 169 p.

18. Krashennikov A.V. Cognitive models of the urban environment: a textbook [Kognitivny`e modeli gorodskoj sredy`: uchebnoe posobie]. Moscow: COURSE, 2021. 209 p. (rus)

19. Lekus E.Yu., Bystryantseva N.V. The light culture of the city. Part I. A problematic approach [Svetovaya kul`tura goroda. Chast` I. Problemny`j podxod]. St. Petersburg: ITMO University, 2018. 123 p. (rus)

20. Lekus E.Yu., Bystryantseva N.V. Light design: light as a material, technology, form [Svetovoj dizajn: svet kak material, texnologiya, forma]. "Material – Technology – Form" as a universal triad in design, architecture, fine and decorative arts [«Material – Texnologiya – Forma» kak universal`naya triada v dizajne, arxitekture, izobrazitel`nom i dekorativnom iskusstve]. Collection of reports of the International Scientific Conference "Stroganov Readings". Moscow: Stroganov Moscow State Art Institute, 2018. Pp. 447–452. (rus)

Information about the authors

Tarassenko, Viktoria N. PhD. E-mail: tarassenko.vn@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yushin, Dmitry N. Engineer. E-mail: Yushin.dn@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Denisova, Julia V. PhD. E-mail: denisova.yv@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 03.11.2024

Для цитирования:

Тарасенко В.Н., Юшин Д.Н., Денисова Ю.В. Формирование комфортного средового пространства с учетом искусственного освещения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 94–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-93-103

For citation:

Tarassenko V.N., Yushin D.N., Denisova Yu.V. Formation of a comfortable environment taking into account artificial lighting. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 7. Pp. 94–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-93-103

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-104-111

Романюк В.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
E-mail: lera_romanyuk_1999@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

Аннотация. Основная цель исследований – разработка технологических решений, направленных на снижение экологической нагрузки путём безопасной утилизации отходов нефтяной промышленности, а также повышение экономической эффективности производства керамических строительных материалов. Включение нефтесодержащих отходов в состав керамических смесей может способствовать улучшению их технологических свойств, что в свою очередь ведёт к сокращению энергозатрат и увеличению рентабельности производства. Кроме того, применение таких отходов в строительной керамике способствует замкнутому циклу производства, что соответствует принципам устойчивого развития и циркулярной экономики.

В качестве основного сырья для получения керамических материалов строительного назначения выбран буровой шлам Славянского месторождения в сочетании со среднепластичной глиной Владимировского месторождения Южного федерального округа. В работе исследованы физико-механические свойства (плотность, водопоглощение, прочность, морозостойкость) керамических строительных материалов на основе отходов нефтедобычи.

По результатам исследования установлено, что при содержании бурового шлама в смеси 60 %, материал обладает прочностью марки М250, морозостойкостью марки F75, средней плотностью 2200 кг/м³, водопоглощением 12,00 %. Показано, что наличие бурового шлама в сырьевой смеси позволяет регулировать свойства получаемого материала, а также снизить содержание глины – природного невозобновляемого сырья.

Ключевые слова: строительная керамика, нефтеотходы, глина, буровой шлам, ресурсосберегающая технология, сырьевая смесь.

Введение. В современном мире восстановление естественных процессов экосистемы Земли приобретает критическую значимость. Антропогенное воздействие, включая промышленные выбросы, загрязнение водных ресурсов и накопление отходов, приводит к деградации окружающей среды, нарушая баланс природных циклов. Особую опасность представляют техногенные отходы, которые не только загрязняют почву, воду и атмосферу, но и препятствуют естественным механизмам самоочищения экосистем. В этих условиях ключевую роль играет разработка и внедрение инновационных методов переработки отходов, способных минимизировать негативное влияние промышленности на природу.

Одним из наиболее проблемных видов промышленных отходов являются буровые шламы – сложные многокомпонентные смеси, включающие выбуренную породу, остатки буровых растворов, нефтепродукты и химические реагенты. Их накопление связано с активной добычей углеводородов, особенно в регионах с развитой нефтегазовой промышленностью.

С 2009 года объемы образующегося бурового шлама увеличились в десятки раз. Это обусловлено несколькими факторами:

- рост числа буровых скважин, расширение нефтедобычи приводит к увеличению количества отходов;
 - отсутствие эффективных технологий переработки, естественное разложение шламов невозможно из-за их химической устойчивости;
 - накопление исторических отходов, отсутствие системной утилизации привело к образованию крупных шламонакопителей.
- Буровые шламы оказывают комплексное негативное воздействие:
- загрязнение почв и грунтовых вод, тяжелые металлы, нефтепродукты и соли проникают в экосистемы, делая земли непригодными для сельского хозяйства;
 - токсическое влияние на живые организмы, накопление вредных веществ в пищевых цепях угрожает биоразнообразию;
 - деградация ландшафтов, шламовые амбары занимают значительные территории, нарушая природные ландшафты [1].

По официальным данным на 2021-2024 гг. Россия входит в десятку лидеров по добыче нефти в мире. В Южном федеральном округе (ЮФО) зарегистрировано свыше 200 месторождений, включающих нефтяные, газонефтяные,

нефтегазовые и нефтегазоконденсатные месторождения. Добычу углеводородного сырья в регионе осуществляют 49 предприятий, среди которых наиболее крупные – ОАО «Газпром», ОАО «НК «Роснефть», ОАО «ЛУКОЙЛ» и их дочерние компании. В условиях активной добычи углеводородного сырья, в частности в ЮФО, возникает проблема, связанная с образованием огромного количества техногенных отходов. Это подчеркивает необходимость реализации эффективных методов утилизации и переработки отходов [2-3].

Полностью избавиться от большого количества техногенных отходов достаточно сложно. В результате буровой шлам накапливается годами и пагубно влияет на экосистему нашей страны. Необходимо способствовать уменьшению накопленных отходов данного типа или даже их полной утилизации.

Помимо глобальной проблемы, связанной с увеличением запасов буровых растворов, существует еще одна, не менее важная – истощение запасов месторождений глинистого сырья, используемого в производстве керамических строительных материалов. На российском рынке данные изделия пользуются большим спросом, так как имеют длительный срок службы. В связи с тем, что месторождения глины истощаются, поиск решений этой проблемы, направленный на разработку новых ресурсосберегающих технологий, становится востребованным.

С 2016 года в России реализуется Стратегия развития строительной отрасли, которая предусматривает поддержку предприятий, внедряющих переработку отходов – налоговые льготы, субсидии, гранты; развитие ресурсосберегающих технологий – поиск замены природного сырья вторичными материалами. Одним из перспективных направлений является использование бурового шлама в производстве керамических материалов. Это решает сразу две проблемы: снижение объема отходов – переработка шлама в полезный продукт; экономия природных ресурсов – частичная замена глины техногенным сырьем.

Современные экологические и экономические вызовы требуют комплексных решений. Переработка бурового шлама в строительные материалы – это не только способ снизить антропогенную нагрузку на природу, но и шаг к устойчивому развитию промышленности. Внедрение таких технологий должно поддерживаться на государственном уровне, включая нормативное регулирование, финансирование исследований и стимулирование предприятий к переходу на "зеленые" методы производства. Только так можно обеспечить баланс между промышленным ростом и сохранением окружающей среды [4-8].

Керамическая промышленность требует большого количества минеральных материалов, и замена части природного сырья техногенными отходами является важным шагом в повышении экологической и экономической эффективности производства [9-12].

Таким образом, целью данной работы является исследование физико-механических свойств керамических строительных материалов на основе отходов нефтедобычи и определение их соответствия требованиям ГОСТ 530-2018 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» [13].

Материалы и методы. Для проведения исследований в качестве основного компонента сырьевой смеси использовался буровой шлам Славянского месторождения ЮФО в сочетании со среднепластичной глиной Владимирского месторождения ЮФО. Предварительно глина и буровой шлам просушивались до остаточной влажности 4–6 %, с дальнейшим измельчением и просеиванием на сите 008. Затем по заданным дозировкам компоненты тщательно перемешивались, и масса равномерно увлажнялась до пластического состояния. Приготовленная керамическая масса вылеживалась в эксикаторе 6-12 часов, после чего было отформовано 5 серий образцов с размерами 60×30×14 мм (по 12 шт. в каждой серии) с содержанием, масс %, глина/ буровой шлам: 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 и 60/40. Далее производилась сушка и обжиг при температуре 1050 °С. В процессе обжига температура повышалась со скоростью 3 °/мин и при конечной температуре была выдержка в течение 30 минут. Охлаждение естественное, продолжительностью 10-14 часов. Затем определялись их физико-механические свойства и их соответствие требованиям ГОСТ 530-2018 [13].

Показатель средней плотности определялся в соответствии с ГОСТ 7025-91 [14].

Объем образцов определяют по их геометрическим размерам, измеренным с погрешностью не более 1 мм. Для определения каждого линейного размера образец измеряют в трех местах – по ребрам и середине грани. За окончательный результат принимают среднее арифметическое трех измерений.

Образцы очищают от пыли и высушивают до постоянной массы в сушильном электрошкафу с регулировкой температуры в пределах 100–110 °С.

Среднюю плотность образца ($\rho_{\text{ср}}$), кг/м³, вычисляли по формуле:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{m}{V} \times 100 \%, \quad (1)$$

где V – объем образца, см³.

За значение средней плотности изделий принимали среднее арифметическое результатов определений средней плотности всех образцов, рассчитанное с точностью до 10 кг/м^3 .

Водопоглощение определялось в соответствии с ГОСТ 7025-91 [14] при атмосферном давлении в воде температурой $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Водопоглощение образцов по массе (W) в процентах вычисляли по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \times 100 \%, \quad (2)$$

где m_1 – масса образца, насыщенного водой, г;

m – масса образца, высушенного до постоянной массы, г.

Эксперимент проводился не менее чем на трех образцах. Образцы предварительно высушивались до постоянной массы, затем их укладывали в один ряд по высоте с зазорами между ними не менее 2 см на решетку в сосуд с водой температурой $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ так, чтобы уровень воды был выше верха образцов на 2–10 см. Образцы выдерживались в воде 48^{+1} ч. Насыщенные водой образцы вынимали из воды, обтирали влажной тканью и взвешивали.

За значение водопоглощения изделий принималось среднее арифметическое результатов определения водопоглощения всех образцов, рассчитанное с точностью до 1 %.

Прочность на сжатие определялась в соответствии с ГОСТ Р 58527–2019 [15].

При определении предела прочности при сжатии были изготовлены образцы с размерами $35 \times 35 \times 35$ мм. После высушивания и до испытаний образцы выдерживали при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ до достижения температурного равновесия. После этого в течение 24 ч проводили испытания. Затем образцы погружали в воду с температурой $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ минимум на 15 ч. Затем образцы вынимались и просушивались в течение 15–20 мин.

Образец устанавливался в центре плиты пресса, совмещая геометрические оси образца и плиты. Нагрузка на образец возрастала непрерывно и равномерно таким образом, чтобы до разрушения образца прошло не менее 60 с.

Предел прочности при сжатии образца $R_{\text{сж}}$, МПа, вычисляли с точностью до 0,1 МПа по формуле:

$$R_{\text{сж}} = P/F, \quad (3)$$

где P – наибольшая нагрузка, установленная при испытании образца, Н;

F – площадь поперечного сечения образца без вычета площади пустот, мм^2 . Площадь поперечного сечения (F) определяют, как среднее арифметическое значение площадей верхней и нижней опорных поверхностей.

Предел прочности при сжатии в серии образцов определяли, как среднее арифметическое значение результатов испытаний установленного числа образцов и округляли до 0,1 МПа.

Морозостойкость определялась количеством циклов замораживания/оттаивания, которым подвергается материал без признаков деформации, снижения прочности или потери массы. Контроль морозостойкости при объемном замораживании проводился в соответствии с ГОСТ 7025-91 [14]. Температура воздуха в камере от начала до конца замораживания составляла -18°C . Продолжительность одного замораживания образцов составляла 4 ч. Продолжительность оттаивания составляла половину продолжительности замораживания и равна 2 часам.

Основная часть. Образцы, изготовленные пластическим способом формования, в соответствии с разработанными составами представлены на рис. 1.

После завершения обжига каждый образец подвергся детальному визуальному осмотру, в ходе которого фиксировались следующие параметры: расположение образцов в печи (для анализа влияния температурных зон на свойства материала); цвет черепка и равномерность его распределения (показатель однородности состава и качества обжига); наличие трещин (может указывать на внутренние напряжения, вызванные резкими перепадами температуры или неоптимальным составом смеси); изменение геометрии образцов (обусловлено неравномерной усадкой из-за колебаний температуры в печи или различий в составе керамической массы); деформации и признаки оплавления (свидетельствуют о локальном или общем пережоге).

В ходе исследования было установлено, что образцы с содержанием бурового шлама 40–60 % продемонстрировали наилучшие технологические характеристики: спекшийся, прочный черепок с однородной микроструктурой; стабильный цвет в диапазоне от красно-коричневого до светло-оранжевого; отсутствие трещин и деформаций, что подтверждает оптимальность температурного режима и состава смеси. В то же время образцы с повышенным содержанием бурового шлама (70–80 %) показали признаки небольшого пережога, потемнение черепка до темно-коричневого оттенка, что связано с избыточной температурой или продолжительностью обжига.

Увеличение доли отходов приводит к ухудшению качества изделий из-за пережога, что может негативно сказаться на их эксплуатационных свойствах.

Для подтверждения результатов были проведены дополнительные исследования, определены

физико-механические свойства исследуемых образцов. Полученные данные представлены в табл. 1.

Согласно требованиям ГОСТ 530–2018, проведенный анализ физико-механических свойств

исследуемых образцов позволяет отнести их к категории обыкновенных керамических изделий по теплотехническим характеристикам. Классификация основана на значениях плотности, которые варьируются в диапазоне 2,0–2,4, что соответствует группе материалов средней плотности.

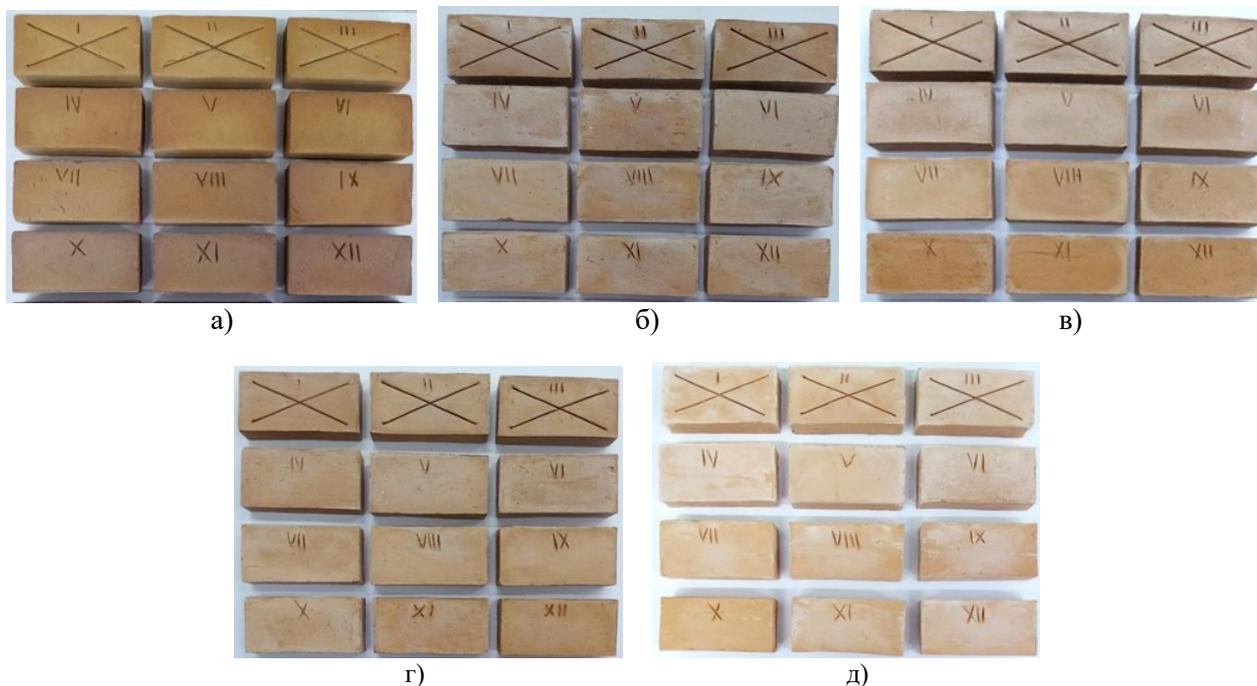


Рис. 1. Лабораторные образцы с содержанием в сырьевой смеси бурового шлама: а) 80 %; б) 70 %; в) 60 %; г) 50 %; д) 40 %

Таблица 1

Физико-механические свойства исследуемых образцов

№ серии	Состав (глина/буровой шлам), %	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Прочность на сжатие, МПа	Морозостойкость,
1	20/80	1980,0	15,77	19,70	F35
2	30/70	2030,0	14,67	23,33	F50
3	40/60	2200,0	12,00	29,34	F75
4	50/50	2260,0	11,11	28,40	F75
5	60/40	2300,0	10,95	28,00	F75

Наблюдается четкая зависимость плотности от состава сырьевой смеси: чем выше процентное содержание бурового шлама, тем ниже плотность конечного продукта. Эта обратно пропорциональная связь объясняется различиями в структуре и свойствах компонентов. Глина, обладая более высокой плотностью и связующей способностью, способствует уплотнению материала, тогда как буровой шлам, имеющий менее плотную структуру, снижает общий показатель.

Таким образом, регулируя соотношение компонентов в исходной смеси, можно целена-

правленно изменять плотность изделий, подбирая оптимальные параметры для конкретных технических и эксплуатационных требований.

Зависимость физико-механических свойств от содержания бурового шлама в сырьевой смеси представлены на рис. 2.

Водопоглощение керамических материалов должно быть не менее 5 % по ГОСТ 530–2018. Этот показатель зависит от температуры обжига, а также показателя плотности образцов. Согласно результатам исследований можно заметить, как с повышением содержания бурового шлама значение водопоглощения повышается.

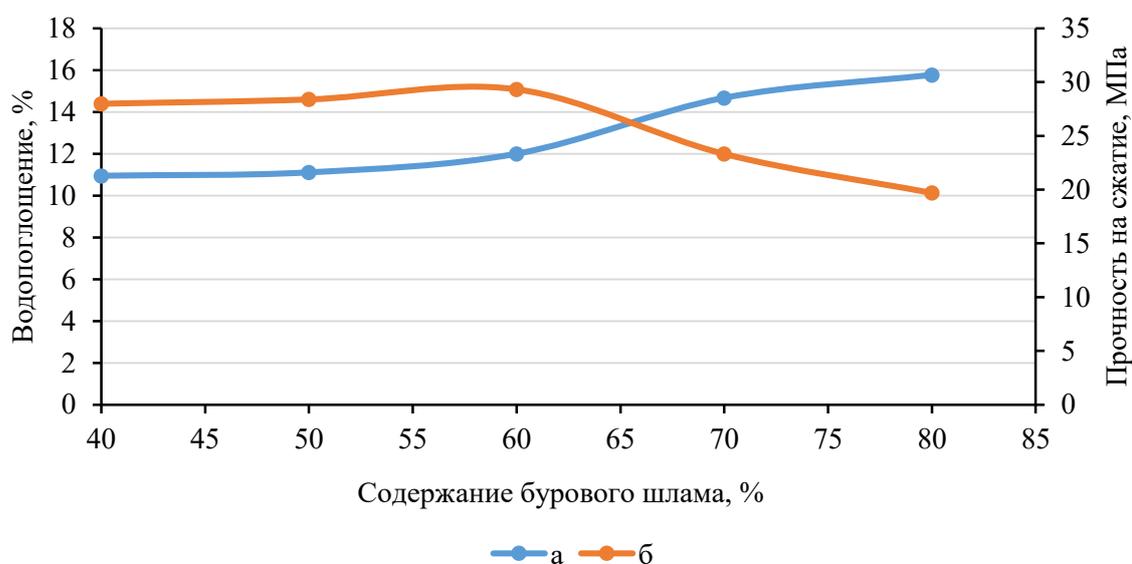


Рис. 2. График зависимости физико-механических свойств от содержания бурового шлама в сырьевой смеси:
 а) зависимость водопоглощения от содержания бурового шлама;
 б) зависимость показателя прочности на сжатие от содержания бурового шлама

На графике показано, что при увеличении содержания бурового шлама прочность образцов постепенно снижается, а водопоглощение растет. Это обусловлено увеличением пористости материала при обжиге, что улучшает теплоизоляционные свойства, но снижает долговечность и морозостойкость.

В соответствии с ГОСТ 530-2018 по полученным данным можно заметить, что самыми оптимальными физико-механическими свойствами обладает серия образцов № 3. Образцы серий № 1 и № 2 вследствие нехватки в сырьевой смеси глины обладают более низкими показателями морозостойкости, а также предела прочности на сжатие. Образцы серий № 4 и № 5 обладают высокими показателями морозостойкости и плотности, предел прочности на сжатие напротив ниже чем у серии образцов № 3.

Таким образом было изучено влияние композиции буровых отходов и глины на физико-механические свойства керамических материалов строительного назначения. Выявлено оптимальное содержание бурового шлама в сырьевой смеси – 60 %. Определен показатель плотности образцов, который соответствует классу средней плотности по ГОСТ 530-2018 и находится в пределах 2,4–2,0. Водопоглощение образцов находится в допустимых пределах по ГОСТ 530-2018 (более 5 %). Определен параметр морозостойкости образцов, который соответствует марке F75 по ГОСТ 530-2018. Найден предел прочности при сжатии, который соответствует марке M250.

Выводы. Результаты исследования показали возможность получения керамических мате-

риалов строительного назначения на основе отходов нефтедобычи, с сохранением целостности и однородности структуры сырца в течение всего технологического цикла. Это позволяет не только снизить объемы отходов, но и повысить качество и характеристики новых материалов, что способствует более устойчивому развитию строительной отрасли в условиях истощения природных ресурсов.

1. Выявлено, что сочетание композиции бурового шлама и глины на этапах подготовки, формования, сушки и обжига обеспечивает соответствие физико-механическим свойствам материала требованиям ГОСТ 530-2018.

2. Установлено, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладает серия образцов с содержанием в сырьевой смеси 60 % бурового шлама (плотность 2200 кг/м³, водопоглощение 12,00 %, прочность на сжатие 29,34 МПа (марка M250), морозостойкость марки F75).

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта «Получение керамических материалов строительного назначения с использованием отходов нефтедобывающей отрасли» при реализации программы развития ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова программы «Приоритет-2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Третьяк А.А., Яценко Е.А., Онофриенко С.А., Карельская Е.В. Идентификация отходов бурения и их использование // Вестник Томского политехнического университета. Георесурсостроение. 2021. Т. 332. № 2. С. 36–43.

2. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы ЮФО на 2021 г.: URL: <https://www.rosnedra.gov.ru> (дата обращения: 01.11.2024 г.)

3. Динамика промышленного производства в 2022-2023 гг.: URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 01.11.2024 г.)

4. Климова А.А., Язиков Е.Г., Шайхиев И.Р. Минералого-геохимическая специфика буровых шламов нефтяных месторождений на примере объектов томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 102–114. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2485

5. Зильберман М.В., Пичугин Е.А., Черепанов М.В., Шенфельд Б.Е., Козлова Г.А. Свойства буровых шламов и возможные направления их утилизации // Башкирский экологический вестник. 2013. № 2 (35). С. 10–14.

6. Пичугин Е.А. Технология утилизации буровых шламов с получением экологически чистого дорожно-строительного материала // Молодой ученый. 2013. № 9 (56). С. 124–126.

7. Гурьева В.А., Бутримова Н.В., Дорошин А.В., Дубинецкий В.В., Вдовин К.М. Эколого-экономический эффект применения нефтешламов при производстве керамического кирпича // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11. С. 50–52.

8. Дубинецкий В.В., Вдовин К.М., Бутримова Н.В. Синтез модифицированного керамического материала на базе кальцийсодержащего техногенного сырья // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 66–71.

9. Иванов Е. А., Беляев Д. В. Рентабельность и окупаемость проектов по утилизации

нефтяных отходов в строительной отрасли // Экономика и управление в строительстве. 2019. № 3. С. 72–81.

10. Денисова Е.И. Экологические аспекты переработки отходов нефтедобычи в производстве строительных материалов. Екб.: Изд-во УрФУ, 2017. 230 с.

11. Мельников П.В., Иванов Л.И. Применение нефтяных отходов в технологии изготовления керамических изделий // Инженерный журнал природопользования и экологии. 2020. № 3. С. 71–78.

12. Зиновьев К.А., Сидорова Л.Н. Оценка физических и химических свойств буровых отходов для использования в строительной керамике // Инженерный журнал переработки отходов. 2020. № 5. С. 34–42.

13. Межгосударственный стандарт ГОСТ 530-2018. Кирпич и керамический камень. Основные характеристики. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). М.: Стандартинформ. 2018.

14. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7025–91. Керамический и силикатный кирпич и камни. Методы определения водопоглощения, контроля плотности и морозостойкости. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ИГС). М.: Стандартинформ. 2006.

15. Межгосударственный стандарт ГОСТ 58527–2019. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ИГС). М.: Стандартинформ. 2019.

Информация об авторах

Романюк Валерия Сергеевна, аспирант кафедры «Общая химия и технология силикатов». E-mail: lera_romanyuk_1999@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132.

Поступила 18.01.2025 г.

© Романюк В.С., 2025

Romanyuk V.S.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

E-mail: lera_romanyuk_1999@mail.ru

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON OIL PRODUCTION WASTE

Abstract. The main objective of the research is to develop technological solutions aimed at reducing the environmental impact through safe disposal of oil industry waste, as well as increasing the economic efficiency of ceramic building materials production. Inclusion of oil-containing waste in ceramic mixtures can help improve their technological properties, which in turn leads to a reduction in energy costs and an increase in production profitability. In addition, the use of such waste in building ceramics contributes to a closed production cycle, which corresponds to the principles of sustainable development and a circular economy.

Drilling mud from the Slavyanskoye deposit in combination with medium-plastic clay from the Vladimirovskoye deposit in the Southern Federal District was chosen as the main raw material for obtaining ceramic materials for construction purposes. The work investigated the physical and mechanical properties (density, water absorption, strength, frost resistance) of ceramic building materials based on oil production waste.

The results of the study showed that with a drill mud content of 60 % in the mixture, the material has M250 grade strength, F75 grade frost resistance, an average density of 2200 kg/m³, and water absorption of 12.00 %. It has been shown that the presence of drilling mud in the raw material mixture allows one to regulate the properties of the resulting material, as well as to reduce the content of clay, a natural non-renewable raw material.

Keywords: *construction ceramics, oil waste, clay, drilling mud, resource-saving technology, raw material mixture.*

REFERENCES

1. Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Onofrienko S.A., Karelskaya E.V. Identification of drilling waste and its use. [Identifikaciya othodov bureniya i ih ispol'zovanie]. Vestnik Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Georesursostroenie. 2021. Vol. 332. No. 2. Pp. 36–43. (rus)
2. Information on the state and prospects for using the mineral resource base of the Southern Federal District for 2021: URL: <https://www.rosnedra.gov.ru> (date of treatment 01.11.2024) (rus).
3. Dynamics of industrial production in 2022-2023: URL: <https://rosstat.gov.ru> (date of treatment 01.11.2024) (rus).
4. Klimova A.A., Yazikov E.G., Shaikhiev I.R. Mineralogical and geochemical specificity of drilling cuttings from oil fields on the example of Tomsk region objects. [Mineralogo-geohimicheskaya specifi-ka burovyyh shlamov neftyanyh mestorozhdenij na primere ob"ektov tomskoj oblasti]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2020. Vol. 331. No. 2. Pp. 102–114. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2485 (rus)
5. Zilberman M.V., Pichugin E.A., Cherepanov M.V., Shenfeld B.E., Kozlova G.A. Properties of drilling mud and possible directions of their utilization. [Svoystva burovyyh shlamov i vozmozhnye napravleniya ih utilizacii]. Bashkirskij ekologicheskij vestnik. 2013. No. 2 (35). Pp. 10-14. (rus)
6. Pichugin, E.A. Technology of recycling drilling mud to produce environmentally friendly road construction material. [Tekhnologiya utilizacii burovyyh shlamov s polucheniem ekologicheski chistogo dorozhno-stroitel'nogo materiala]. Molodoj uchenyj. 2013. No. 9 (56). Pp. 124–126. (rus)
7. Guryeva, V.A., Butrimova N.V., Doroshin A.V., Dubinetsky V.V., Vdovin K.M. Ecological and economic effect of using oil sludge in the production of ceramic bricks. [Ekologo-ekonomicheskij effekt primeneniya nefteshlamov pri proizvodstve keramicheskogo kirpicha]. Mezhdunarodnyj nauchno-is-sledovatel'skij zhurnal. 2016. No. 11. Pp. 50–52. (rus)
8. Dubinetsky V.V., Vdovin K.M., Butrimova N.V. Synthesis of modified ceramic material based on calcium-containing technogenic raw materials. [Sintez modifirovannogo keramicheskogo materiala na baze kal'cijsoderzhashchego tekhnogenno go syr'ya]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. No. 11. Pp. 66–71. (rus)
9. Ivanov E.A., Belyaev D.V. Profitability and payback of projects for the disposal of oil waste in the construction industry. [Rentabel'nost' i okupaemost' proektov po utilizacii neftyanyh othodov v stroitel'noj otrasli]. Ekonomika i upravlenie v stroitel'stve. 2019. No. 3. Pp. 72–81. (rus)
10. Denisova E.I. Environmental Aspects of Oil Waste Processing in the Production of Building Materials. [Ekologicheskie aspekty pererabotki othodov neftedobychi v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Ekb: UrFU. 2017. 230 p. (rus)
11. Melnikov P.V., Ivanov L.I. Use of oil waste in the technology of manufacturing ceramic products. [Rentabel'nost' i okupaemost' proektov po uti-lizacii neftyanyh othodov v stroitel'noj otrasli]. Ekonomika i upravlenie v stroitel'stve. 2020. No. 3. Pp. 71–78. (rus)
12. Zinoviev K.A., Sidorova L.N. Evaluation of physical and chemical properties of drilling waste for use in building ceramics. [Ocenka fizicheskikh i himicheskikh svoystv burovyyh othodov dlya ispol'zovaniya v stroitel'noj keramike]. Inzhenernyj zhurnal pererabotki othodov. 2020. No. 5. Pp. 34–42. (rus)
13. Interstate standard GOST 530-2018. Brick and ceramic stone. Main characteristics. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (IGS). M.: Standartinform. 2018. (rus)
14. Interstate standard GOST 7025-91. Ceramic and sand-lime brick and stones. Methods for determining water absorption, density control and frost resistance. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (IGS). M.: Standartinform. 2006. (rus)
15. Interstate standard GOST 58527-2019. Wall materials. Methods for determining compressive strength and bending. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (IGS). M.: Standartinform. 2019. (rus)

Information about the authors

Romanyuk, Valeria S. Postgraduate student of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates. E-mail: lera_romanyuk_1999@mail.ru. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia, 346428, Novocherkassk, Prosveshcheniya St., 132.

Received 18.01.2025

Для цитирования:

Романюк В.С. Исследование физико-механических свойств керамических строительных материалов на основе отходов нефтедобычи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-104-111

For citation:

Romanyuk V.S. Study of physical and mechanical properties of ceramic construction materials based on oil production waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-104-111

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-112-121

Бондаренко Н.В., Татаринцев И.В., Соколов М.В.Тамбовский государственный технический университет***E-mail: nikbon.2015@yandex.ru*

СИСТЕМА РАСЧЕТА ПРИПУСКА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Развитие информационных технологий затрагивает все сферы жизнедеятельности человека, в том числе и машиностроение, которое, по мере внедрения различных информационных систем все чаще называют цифровым машиностроением. Однако многие задачи, выполняемые инженерами-технологами, все еще приходится решать вручную.

В свою очередь, развитие машиностроения требует от инженеров-технологов быстрой и качественной разработки технологических процессов. С учетом развития и информационных технологий, возникает потребность в быстром поиске информации и выполнении расчетов, необходимых для составления технологического процесса. Существует множество программ, упрощающих работу технологов, такие как: Вертикаль, Компас-3D, Technologic, AutoCAD, однако иногда их бывает недостаточно. Это связано в первую очередь с уменьшением размеров деталей, увеличением сложности их изготовления и возрастающих требований к качеству выпускаемой продукции, что непосредственно влияет на сроки изготовления деталей и их стоимость. Совокупность всех перечисленных факторов требует развития уже существующего и создания нового инженерного программного обеспечения.

Представленная в этой статье система расчета припуска предназначена для решения одной из задач технологов – определения припуска на механическую обработку деталей.

Ключевые слова: алгоритм, допуск, межоперационные размеры, припуск на механическую обработку деталей, программа.

Введение. Перед современным машиностроением стоят цели по автоматизации технологических процессов и оптимизации экономических затрат на производство. Особенно это актуально при увеличении планов выпуска продукции на имеющемся на производстве оборудовании без увеличения производственных мощностей. Достичь обозначенных целей можно, решив инженерные задачи, касающиеся разработки технологических процессов, в частности – автоматизировать процесс расчета припуска на механическую обработку деталей.

Изготовление деталей из различных металлов подразумевает механическую обработку – токарную, фрезерную или иную другую. Во время обработки заготовки, с нее снимают припуск – слой материала, который необходимо удалить, чтобы получить деталь с заданными конструкторской документацией геометрическими параметрами, размерами и шероховатостью поверхности. Расчет припуска является одной из задач инженера-технолога, решение которой влияет на длительность обработки детали, качество выпускаемой продукции и ее стоимость. Большая величина припуска приводит к увеличению времени обработки детали, и, соответственно, к удорожанию продукции. Недостаточная толщина припуска может не обеспечить требуемое качество поверхности (шероховатость) или требуемую величину размеров, что приводит к браку.

Существует два метода определения припуска – аналитический и справочный. Первый метод подразумевает расчет по формулам, с поиском необходимых коэффициентов в справочной литературе. Этот метод более точный, но требует больших затрат времени. Второй метод подразумевает использование уже рассчитанных параметров из справочников, что сокращает время, но ведет к повышенному расходу материала, так как эти параметры подходят не для всех деталей и поэтому завышены с целью избежать возникновения брака. Таким образом, оба метода имеют свои недостатки, которые в итоге отражаются на времени изготовления детали, и, соответственно, ее стоимости.

Учитывая все вышесказанное, и тот факт, что одним из методов автоматизации процессов является разработка и внедрение в производство информационных систем [1–3], а также оценив задачу автоматизации расчета припуска на механическую обработку деталей как актуальную, стало очевидно, что решение данной задачи заключалось в разработке программы для ЭВМ. Разумеется, разработанная программа должна была бы совмещать преимущества обоих методов определения припуска: использовала бы формулы для расчета, и подбирала бы коэффициенты для них на основе справочной литературы, при этом необходимо было устранить недостатки указанных методов.

Основная часть. Теоретические аспекты во многом были разработаны и представлены в книгах [4–7] и статье [8]. Исходные данные для расчета припуска обычно изложены в чертеже детали – это все размеры, шероховатость и материал. С учетом этих данных технолог подбирает необходимое количество операций и назначает межоперационные размеры и допуски к ним. Для проверки правильности подобранных операций и размеров рассчитывается коэффициент уточнения – ε_i :

$$\varepsilon_i = T_{i-1}/T_i \quad (1)$$

где T_{i-1} – поле допуска размера, полученного на предыдущей операции (или заготовки), T_i – поле допуска размера, получаемого на выполняемой операции. Коэффициент уточнения рассчитывается для всех операций, на которых обрабатывается один конкретный размер. После нахождения коэффициентов уточнения, вычисляется общее уточнение:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \varepsilon_3 \times \dots \times \varepsilon_n \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_n$ – коэффициенты уточнения для 1-й, 2-й, 3-й операции до конечной операции.

После этого рассчитывается требуемое уточнение:

$$\varepsilon_i = T_3/T_d \quad (3)$$

где T_3 – поле допуска на размер заготовки, T_d – поле допуска на размер детали, для которого рассчитывается припуск.

Сравнив требуемое уточнение с общим уточнением можно определить правильность выбранных операций. Если $\varepsilon_{\text{общ}} \geq \varepsilon_{\text{то}}$, то операции и допуски подобраны правильно, однако идеальным является вариант, когда коэффициенты равны, так как завышение $\varepsilon_{\text{общ}}$ хоть и гарантирует получение детали с соблюдением требований чертежа, но ведет к увеличению времени изготовления детали. Если $\varepsilon_{\text{общ}} < \varepsilon_{\text{то}}$, то операции подобраны неверно и необходимо заново выполнить подбор допусков на межоперационные размеры, или увеличить количество операций для обработки размера. При составлении технологического процесса следует учитывать возможность обработки нескольких разных поверхностей в одной операции с применением многокоординатных станков с ЧПУ. Однако, чем больше на чертеже детали поверхностей и размеров, тем больше требуется времени на подбор операций, проверку правильности подбора, и, конечно, на расчет припуска. Кроме того, возрастает риск ошибки, которая приведет к браку.

Значительное снижение времени на выполнение расчетов и существенное снижение вероятности ошибки также подчеркивают полезность разработанной программы.

Для представления взаимосвязи размеров детали, заготовки и межоперационных, составлена схема, изображенная на рисунке 1.

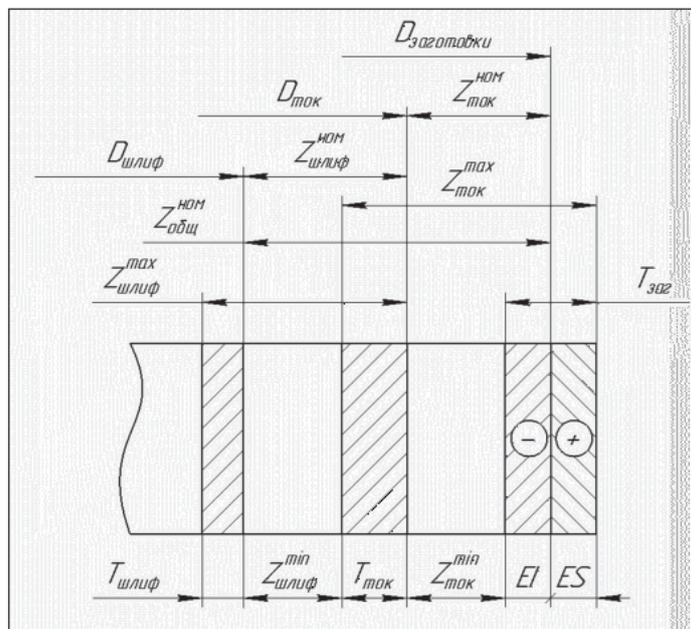


Рис. 1. Расположение допусков, припусков и межоперационных размеров

На рисунке 1 представлены следующие обозначения: $D_{\text{шлиф}}$ – диаметр детали после шлифовки, $D_{\text{ток}}$ – диаметр детали после токарной обработки, $D_{\text{заготовки}}$ – диаметр заготовки, $T_{\text{шлиф}}$ – поле допуска на размер детали, получаемый на

шлифовальной операции, $T_{\text{ток}}$ – поле допуска на размер детали, получаемый на токарной операции, $T_{\text{заг}}$ – поле допуска размера заготовки, EI – нижнее предельное отклонение заготовки, ES – верхнее предельное отклонение заготовки, $Z_{\text{шлиф}}^{\text{мин}}$

– минимальный припуск на шлифовальную операцию, $Z_{\text{шлиф}}^{\text{ном}}$ – номинальный припуск на шлифовальную операцию, $Z_{\text{шлиф}}^{\text{max}}$ – максимальный припуск на шлифовальную операцию, $Z_{\text{ток}}^{\text{min}}$ – минимальный припуск на токарную операцию, $Z_{\text{ток}}^{\text{ном}}$ – номинальный припуск на шлифовальную операцию, $Z_{\text{ток}}^{\text{max}}$ – максимальный припуск на шлифовальную операцию.

Для расчета припуска используются следующие формулы:

$$Z_{\text{imin}} = Rz_{i-1} + h_{i-1} + \Delta_{i-1} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$Z_i = Z_{\text{imin}} + eiD_{i-1} + esD_i \quad (5)$$

$$Z_{\text{imax}} = Z_{\text{imin}} + ITD_{i-1} + ITD_i \quad (6)$$

где Z_{imin} – минимальный припуск для выполняемой операции, Z_i – номинальный припуск для выполняемой операции, Z_{imax} – максимальный припуск для выполняемой операции, Rz_{i-1} – шероховатость, полученная на предшествующей операции или заготовки, h_{i-1} – глубина дефектного слоя, Δ_{i-1} – суммарное отклонение расположения поверхностей, ε_i – погрешность закрепления заготовки, eiD_{i-1} – нижнее предельное отклонение размера, полученного на предыдущей операции, esD_i – верхнее предельное отклонение размера, получаемого на выполняемой операции, ITD_{i-1} – поле допуска размера, полученного на предыдущей операции, ITD_i – поле допуска размера, получаемого на выполняемой операции.

Формулы (4), (5), (6) можно использовать для любых расчетов, но для более точных расчетов используются отдельные формулы [4, 7]. Представленные выше формулы использовались для написания кода программы.

Для реализации поставленной цели на практике требовалось решить несколько задач:

1. Используя теоретическую базу, разработать алгоритм работы программы;
2. Все известные справочные параметры, используемые для расчетов, перевести в электронный формат в виде базы данных;
3. Разработать на основе алгоритма исполняемый код программы;
4. Провести тестирование и отладку кода.

Первая задача заключалась в переносе справочной информации в электронный формат, причем в таком виде, в котором эту информацию мог бы воспринимать компьютер. То есть, просто отсканировать имеющиеся справочники было недостаточно. Для решения этой задачи подходила любая программа для работы с базами данных, самой простой из которых был Microsoft Excel. Еще одной из причин, по которым был выбран именно Excel является его совместимость с языком программирования Python, на котором ве-

лась разработка программы. В Excel были созданы таблицы со справочными значениями коэффициентов, из этих таблиц Python извлекал нужные значения и подставлял их в формулы, записанные в исполняемом файле программы. Такой подход позволяет при необходимости корректировать значения в таблицах, при этом не затрагивая код программы.

Вторая задача была более сложной, так как требовала разработать алгоритм работы программы и написать ее код. Решено было реализовать эту задачу с использованием языка программирования Python, к преимуществам которого относятся: простота освоения, наличие множества модулей для решения практически любой задачи, а также большое сообщество пользователей, которое подскажет как исправить ошибки в коде. Важнейшим преимуществом Python перед другими языками программирования является возможность разработки нейронных сетей, что позволяет использовать разработанную программу в структуре искусственного интеллекта. В первую очередь был разработан алгоритм работы программы с использованием книг [4–6] и представленный на рисунке 2.

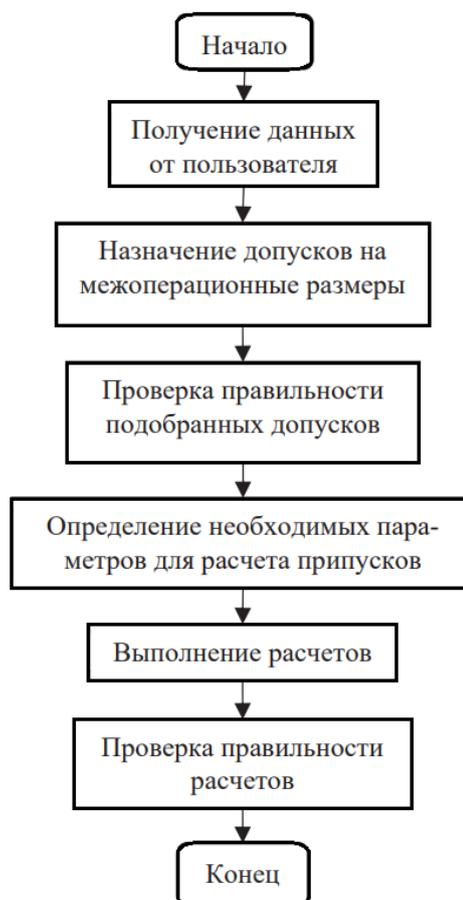


Рис. 2. Алгоритм системы расчета припуска
Для обеспечения качества выполняемых программой расчетов использовалась информация из работ [9–11], в которых описаны вопросы

обеспечения качества изделий на стадии технологической подготовки производства, рассмотренные при проектировании системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров.

Так как расчет припуска выполняется на конкретный размер, толщина срезаемого слоя будет зависеть от параметра шероховатости и допуска на этот размер. С учетом того, что чем меньше допуск, тем больше потребуется операций для обеспечения точности размера (максимум 4 операции: черновая обработка, получистовая обработка, чистовая обработка и финишная обработка), программа должна рассчитывать межоперационные размеры, то есть размеры, полу-

чаемые после выполнения операций, но отличающиеся от окончательного размера. Для этого программа определяет качество размера детали, рассчитывая значение поля допуска размера на основании введенных пользователем допустимых отклонений, а затем, сравнивая номинальное значение размера и рассчитанное значение поля допуска со всеми возможными качествами. После установления качества программа определяет требуемое количество операций. Принцип определения качества представлен на рисунке 3 и соответствует принципам, заложенным в государственных и отраслевых стандартах [12, 13]. Фрагмент кода для определения качества представлен на рисунке 4.

Интервалы размеров, мм	Поля допусков валов, мкм											
	h5	g6	h6	j6	k6	n6	g6	f7	h7	s7	e8	u8
	Предельные отклонения, мкм											
От 1 до 3	0	-2	0	+3	+6	+10	+16	-6	0	+24	-14	+32
	-4	-8	-6	-3	0	+4	+10	-16	-10	+14	-28	+18
Св. 3 до 6	0	-4	0	+4	+9	+15	+23	-10	0	+31	-20	+41
	5	12	0	4	+1	+8	+15	22	12	+19	30	+23
Св. 6 до 10	0	-5	0	+4,5	+10	+17	+28	-13	0	+38	-25	+50
	-6	-14	-9	-4,5	+1	+10	+19	-28	-15	+23	-47	+28
Св. 10 до 18	0	-6	0	+5,5	+12	+23	+34	-16	0	+46	-32	+60
	-8	-17	-11	-5,5	+1	+12	+23	-34	-18	+28	-59	+33
Св. 18 до 24	0	-7	0	+6,5	+15	+28	+41	-20	0	+56	-40	+74
	-9	-20	-13	-6,5	+2	+15	+28	-41	-21	+35	-73	+81
Св. 24 до 30												+48

Рис. 3. Принцип определения качества

```
Python 3.8.3 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 3.8.3 (tags/v3.8.3:6f8c832, May 13 2020, 22:37:02) [MSC v.1924 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
===== RESTART: C:\Users\Nekki\Desktop\Prog\NewProg v.2.py =====
['Лист1']
Укажите диаметр детали в мм: 3
Укажите верхнее отклонение диаметра в мм: 0
Укажите нижнее отклонение диаметра в мм: -0.01
Укажите длину обрабатываемой поверхности в мм: 5
Допуск на диаметр детали: 0.01 мм

Укажите размер заготовки в мм: 5
Укажите верхнее отклонение размера в мм: 0
Укажите нижнее отклонение размера в мм: -0.2
Допуск на размер заготовки: 0.2 мм

-----
Квалитет: 7
```

Рис. 4. Код программы для определения качества

После определения требуемого количества операций, программа назначает допуск на межоперационные размеры и высчитывает поле допуска, необходимое для дальнейших расчетов.

Далее программа получает информацию о типе заготовке (прокат, поковка, штамповка, литье) и определяет шероховатость Rz и глубину дефектного слоя h заготовки и вычисляет геометрические погрешности заготовки. Для этого используются данные, получаемые из созданной

таблицы Excel. Пример такой таблицы представлен в таблице 1.

Таблица 1

**Качество поверхности поковок,
изготавливаемых штамповкой**

Качество поверхности поковок, изготавливаемых штамповкой		
Масса поковки, кг	Rz, мкм	h, мкм
До 0,25	80	150
Св. 0,25 до 4	160	200
Св. 4 до 25	200	250
Св. 25 до 40	250	300
Св. 40 до 100	320	350
Св. 100 до 200	400	400

Кроме геометрических отклонений заготовки программа также рассчитывает погрешность закрепления заготовки в приспособлении. На выбор пользователя предлагается несколько вариантов крепления заготовок: с использованием в качестве баз торцов детали, наружных и внутренних диаметров. После расчета погрешностей, программа определяет припуск для каждой операции, причем вычисляет максимальный, номинальный и минимальный припуск.

Программа была протестирована на нескольких размерах, а оценка ее эффективности проводилась в сравнении с ручным расчетом припуска. Пример расчета припуска для размера $\varnothing 120h6(0; -0,022)$ мм представлен на рисунке 5.

```

['Лист1']
Укажите диаметр детали в мм: 120
Укажите верхнее отклонение диаметра в мм: 0
Укажите нижнее отклонение диаметра в мм: -0.022
Укажите длину заготовки в мм: 60
Допуск на диаметр детали: 0.022 мм

Укажите размер заготовки в мм: 130
Укажите верхнее отклонение размера в мм: 0
Укажите нижнее отклонение размера в мм: -0.5
Допуск на размер заготовки: 0.5 мм

Требуемое уточнение: 22.723

-----
Квалитет: 6
Выполняется подбор операций
22.723 22.723
Операции подобраны верно
Определение операций завершено.

-----
Укажите заготовку (прокат, поковка, штамповка, литье): штамповка
Укажите массу штамповки (от 0 до 200 кг): 10
Rz = 200 мкм; h = 250 мкм.

-----
Укажите на чём изготавливалась штамповка (молот/пресс): молот
Укажите точность штамповки (повышенная/нормальная): нормальная
Укажите, как закреплена заготовка:
[1] Вал ступенчатый в патроне, без поджатия задним центром
[2] Вал ступенчатый в центрах
[3] Деталь типа диск с просовываемым центральным отверстием с установкой по наружному диаметру и торцу
[4] Деталь типа диск с просовываемым центральным отверстием с установкой по наружному диаметру и торцу при обработке торцевой поверхности
3
Δк = 1200 мкм.
Δ = 1843.9088914585775 мкм.
ε = 0 мкм.

-----
Минимальный припуск для черновой обработки: 4.5878177829171545 мм
Минимальный припуск для получистовой обработки: 0.4212690669750293 мм
Минимальный припуск для чистовой обработки: 0.17106345334875148 мм
Минимальный припуск для финишной обработки: 0.10044253813395005 мм
Максимальный припуск для черновой обработки: 6.0878177829171545 мм
Максимальный припуск для получистовой обработки: 1.7212690669750292 мм
Максимальный припуск для чистовой обработки: 0.5710634533487514 мм
Максимальный припуск для финишной обработки: 0.3224425381339501 мм
Номинальный припуск для черновой обработки: 5.0878177829171545 мм
Номинальный припуск для получистовой обработки: 1.4212690669750292 мм
Номинальный припуск для чистовой обработки: 0.4710634533487514 мм
Номинальный припуск для финишной обработки: 0.30044253813395005 мм
Рекомендуемый диаметр заготовки: 127.28059284137488 мм
>>> |

```

Рис. 5. Пример расчета припуска по программе для ЭВМ

Очевидно, программа выполняет расчеты с точностью до 10^{-16} степени, что для машиностроения является излишним, так как не существует инструментов и способов обеспечить такую точность, поэтому для практической работы рекомендуется принимать значения с точностью до 10^{-3} степени.

Выполнение расчета припуска для размера $\varnothing 120h6(0; -0,022)$ мм аналитическим методом (вручную):

1) Перед началом расчетов необходимо знать диаметр заготовки, поскольку условием задачи диаметр не задан, принимаем его равным

$\varnothing 130(0; -0,5)$ мм – это предположительный размер заготовки.

Поля допусков для детали и для заготовки:

$$Td = 0 - (-0,022) = 0,022 \text{ мм}$$

$$Tz = 0 - (-0,5) = 0,5 \text{ мм}$$

Требуемое уточнение:

$$\varepsilon_{\text{то}} = \frac{0,5}{0,022} = 22,72(72)$$

2) Назначаем требуемое количество операций и допуски на межоперационные размеры:

1-ая операция – черновая обработка – допуск $(0; -0,5)$;

2-ая операция – получистовая обработка – допуск $(0; -0,2)$;

3-я операция – чистовая обработка – допуск (0; -0,1);

4-ая операция – финишная обработка – допуск (0; -0,022).

Определяем поля допусков для каждой операции:

$$T_{\text{черн.}} = 0 - (-0,5) = 0,5 \text{ мм}$$

$$T_{\text{п.чист.}} = 0 - (-0,2) = 0,2 \text{ мм}$$

$$T_{\text{чист.}} = 0 - (-0,1) = 0,1 \text{ мм}$$

$$T_{\text{фин.}} = 0 - (-0,022) = 0,022 \text{ мм}$$

Коэффициент уточнения для каждой операции:

$$\varepsilon_{\text{черн.}} = \frac{0,5}{0,5} = 1$$

$$\varepsilon_{\text{п.чист.}} = \frac{0,5}{0,2} = 2,5$$

$$\varepsilon_{\text{чист.}} = \frac{0,2}{0,1} = 2$$

$$\varepsilon_{\text{фин.}} = \frac{0,1}{0,022} = 4,54(54)$$

Общее уточнение:

$$\varepsilon_{\text{общ.}} = 1 \times 2,5 \times 2 \times 4,54(54) = 22,72(72)$$

Значения $\varepsilon_{\text{то}}$ и $\varepsilon_{\text{общ.}}$ равны, значит операции подобраны правильно.

3) Определяем погрешности:

Шероховатость и глубину дефектного слоя принимаем равными: $Rz = 200$ мкм; $h = 250$ мкм.

$$2Z_{\text{мин.черн.}} = 2(200 + 250) + 2\sqrt{1843,9^2 + 0^2} = 4587,8 \text{ мкм} = 4,587 \text{ мм}$$

$$2Z_{\text{ном.черн.}} = 4587,8 + |-500| + 0 = 5087,8 \text{ мкм} = 5,087 \text{ мм}$$

$$2Z_{\text{макс.черн.}} = 4587,8 + (0 - (-500)) + (0 - (-500)) = 5587,8 \text{ мкм} = 5,587 \text{ мм}$$

5) Повторяем пункты 3 и 4 для всех операций, полученные результаты вносим в таблицу 2.

$$Z = 120 + 5,087 + 0,921 + 0,371 + 0,2 = 126,579 \text{ мм} \approx 126,6 \text{ мм}$$

На ручной расчет припуска потребовалось 22 минуты 40 секунд (1360 секунд), тогда как

$$\frac{1360}{47} = 28,93 \approx 29 \times 100\% = 2900\%$$

Очевидно, что за то время, которое было затрачено на ручной расчет припуска для одного размера, программа может выполнить расчет для 29-ти размеров, и таким образом, эффективность в сравнении с ручным расчетом составляет 2900%. Кроме этого, был определен оптимальный требуемый размер заготовки – если изначально было предположение, что необходимым диаметром является $\varnothing 130$ мм, то в конце расчетов (как ручных, так и программных), выяснилось, что размером, достаточным для получения детали, соответствующей чертежу, будет $\varnothing 126,6$ мм. Результаты расчетов сведены в таблицу 2 для наглядности.

На описанную в этой статье программу, а также на модуль для нее, разработанный дополнительно в процессе дальнейших исследований,

Суммарные геометрические отклонения будут равны 1843,9 мкм (рассчитывается по формулам, согласно [4], здесь приведен результат расчета).

Погрешность базирования $\varepsilon = 0$, т.к. обработка детали ведется в трехлапчатом патроне (схемы закрепления, формулы и значения погрешностей представлены в [4]).

4) Рассчитываем минимальный, номинальный и максимальный припуск для черновой операции:

$$2Z_{\text{мин}} = 2(Rz_{i-1} + h_{i-1}) + 2\sqrt{\Delta_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \quad (7)$$

$$2Z_{\text{ном}} = 2Z_{\text{мин}} + eiD_{i-1} + esD_i \quad (8)$$

$$2Z_{\text{макс}} = 2Z_{\text{мин}} + ITD_{i-1} + ITD_i \quad (9)$$

где Rz_{i-1} – шероховатость поверхности на предыдущей операции, h_{i-1} – глубина дефектного слоя на предыдущей операции, Δ_{i-1} – суммарные отклонения расположения поверхностей, ε_i – погрешность установки заготовки в приспособлении, eiD_{i-1} – верхнее предельное отклонение размера на предыдущей операции, esD_i – нижнее предельное отклонение размера на выполняемой операции, ITD_{i-1} – поле допуска размера на предыдущей операции, ITD_i – поле допуска размера на выполняемой операции.

б) Определяем реальный размер заготовки:

программа справилась за 47 секунд. Сравнивая затраты времени, получаем результат:

были оформлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [14, 15], а более подробное описание процесса разработки представлено в книге [7]. Дальнейшее развитие программы позволит использовать ее как часть интеллектуальной системы управления производством, такая возможность рассматривается в статьях [16, 17].

Выводы. Разработанная система расчета припусков решает одну из многих технологических задач и позволяет сократить время на выполнение расчетов, при этом выдает качественный результат, что напрямую влияет на стоимость изготовления детали.

Следует отметить, что используемое при разработке технологически процессов программное обеспечение, в частности, представленные в России программами Вертикаль, Компас-3D,

TechnologiCS, NanoCAD не обладают функцией расчета припуска. Использование разработанной программы в совокупности с CAD/CAE систе-

мами позволит визуально отобразить расположение и толщину припуска на поверхностях детали, что в свою очередь поможет технологу при составлении технологического процесса.

Таблица 2

Сравнение значений припусков, полученных при ручном расчете и с помощью программы

Z_i	Значение $Z_{i\min}$, рассчитанное вручную	Значение $Z_{i\min}$, рассчитанное программой
$Z_{\min.черн.}$	4,5878 мм	4,5878 мм
$Z_{\min.п.чист.}$	0,4212 мм	0,4212 мм
$Z_{\min.чист.}$	0,171 мм	0,171 мм
$Z_{\min.финиш.}$	0,1 мм	0,1 мм
$Z_{ном.черн.}$	5,0878 мм	5,0878 мм
$Z_{ном.п.чист.}$	0,921 мм	1,421 мм
$Z_{ном.чист.}$	0,371 мм	0,471 мм
$Z_{ном.финиш.}$	0,2 мм	0,3 мм
$Z_{макс.черн.}$	5,5878 мм	6,2878 мм
$Z_{макс.п.чист.}$	1,021 мм	1,7212 мм
$Z_{макс.чист.}$	0,471 мм	0,571 мм
$Z_{макс.финиш.}$	0,222 мм	0,322 мм

Представленная программа может стать частью «умного производства», такого типа производства, когда большую часть работы выполняют машины под наблюдением информационных систем, в том числе с использованием искусственного интеллекта. Одной из причин, по которой программа разрабатывалась на языке программирования Python является частое его использование учеными и разработчиками для работы с нейросетями, что позволяет объединить разработанную программу с другими, решающими иные инженерные задачи, и искусственным интеллектом (нейросетью) в единую систему, которая и станет основой «умного производства».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация производства [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://www.expo-centr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/?ysclid=m6mklv075543084715> (дата обращения: 12.09.2024)
2. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://bercut.com/blog/technologies/avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-protsssov/?ysclid=m6gw3o1pox76874985> (дата обращения: 12.09.2024)
3. Дронов В.Д. Автоматизация машиностроительных производств в условиях многономенклатурного серийного производства // Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. 2024. С. 552–554.

4. Радкевич Я.М., Тимирязев В.А., Схиртладзе А.Г., Островский М.С. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении: Учеб. пособ. для машиностроит. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2004. 272 с.

5. Борисов В.Б., Борисов Е.И., Васильев В.Н., Волчкевич Л.И., Воробьев Ю.А., Гайгал И.В., Калашников А.С., Калашников С.Н., Калинин М.А., Калинин М.М., Капустин Н.М., Кацев П.Г., Ковалев В.К., Козунко Б.М., Косилова А.Г., Мещеряков А.И., Мещеряков К.Р., Мещеряков Р.К., Наерман М.С., Новиков А.Н., Орлов П.Н., Панов А.А., Попов Е.А., Рыжов Э.В., Сизенов Л.К., Стародубов В.С., Сухов М.Ф., Фруммин Ю.Л., Цейтлин Л.Б., Шеметов М.Г. Справочник технолога машиностроителя в двух томах. Том 1. Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.

6. Гриднев В.Н., Досчатов В.В., Замалин В.С., Жданов А.И., Исаченко В.К., Малов А.Н., Орлов П.Н., Панченко К.П., Рождественский Л.А., Стасюнас А.П., Шачнев Ю.А., Шнейдер Ю.Г., Якушев, А.И. Справочник технолога машиностроителя в двух томах. Том 2. Под ред. А.Н. Малова. М.: Машиностроение, 1973. 568 с.

7. Бондаренко Н.В. Автоматизированная система расчета припусков на механическую обработку деталей : монография Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 132 с.

8. Бондаренко Н.В., Татаринцев И.В., Вшивков Ф.И. Онтология припусков на механическую обработку деталей // Моделирование энергоинформационных процессов : IX Национальная научно-практическая конференция с международным участием, Воронеж, 22-24 декабря 2020

года. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2021. С. 97–100.

9. Пестрецов С.И., Алтунин К.А., Соколов М.В., Однолько В.Г. Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения. Издательский дом «Спектр», 2012. 212 с.

10. Бондаренко Н.В., Соколов М.В. Разработка алгоритма расчета припуска на механическую обработку деталей для среды программирования Python // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 674–684. DOI: 10.17277//vestnik.2022.04.P. 674-684. EDN UIMJAE.

11. Алтунин К.А., Пестрецов С.И. Оценка возможности применения CAD/CAE/CAM-систем при проектировании процессов резания и металлорежущих станков // Материалы III-й Всерос. науч.-практ. кластерной заочной электронной конф. «Кооперация науки, образования, производства и бизнеса: новые идеи и перспективы безопасного развития в ближайшем будущем». 2011. С. 347–348.

12. ГОСТ Р 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2009-12-09 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. Москва : Стандартинформ, 2010. 62 с.

13. ОСТ 1 00022-80. Предельные отклонения размеров от 0,1 до 10000 мм и допуски формы и расположения поверхностей, не указанные на

чертеже : отраслевой стандарт Российской Федерации : дата введения 1981-07-01 / утвержден и введен в действие распоряжением министерства №81-16/5 от 19 сентября 1980. Изд. официальное. Москва : Стандартинформ, 1981. 24 с.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023663752. Автоматизированная система расчета припуска на механическую обработку (Automated calculation of the processing allowance) / Бондаренко Н.В. (RU), Соколов М.В. (RU) Заявитель и правообладатель: Федеральное Государственное Учреждение Высшего Образования «Тамбовский Государственный Технический Университет» (RU) Заявка №2023661993; заявл. 06.06.2023; зарег. 27.06.2023

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023663117. Модуль программы расчета припуска на механическую обработку (Calculation of allowance for metal machining) / Бондаренко Н.В. (RU), Соколов М.В. (RU) Заявитель и правообладатель: Федеральное Государственное Учреждение Высшего Образования «Тамбовский Государственный Технический Университет» (RU) Заявка №2023661989; заявл. 06.06.2023; зарег. 20.06.2023

16. Хонин К.А., Ермолаев Р.А. Совершенствование технологического процесса в условиях автоматизированного производства // Молодой ученый. 2018. № 25 С. 151–155.

17. Алтунин К.А., Соколов М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22, № 1. С. 122–133. DOI: 10.17277//vestnik.2016.01.p. 122-133.

Информация об авторах:

Бондаренко Никита Владимирович, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: nikbon.2015@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Татаринцев Илья Владимирович, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: tatarintzew.ilya2012@yandwex.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Соколов Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: msok68@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Поступила 05.08.2024 г.

© Бондаренко Н.В., Татаринцев И.В., Соколов М.В., 2025

***Bondarenko N.V., Tatarintsev I.V., Sokolov M.V.**

Tambov State Technical University

*E-mail: nikbon.2015@yandex.ru

THE ALLOWANCE CALCULATION SYSTEM FOR MACHINING PARTS

Abstract. The development of information technologies affects all spheres of human life, including mechanical engineering, which, with the introduction of various information systems, is increasingly called digital engineering. However, many tasks performed by process engineers still have to be solved manually.

In turn, the development of mechanical engineering requires process engineers to develop technological processes quickly and efficiently. Taking into account the development of information technologies, there is a need for a quick search for information and performing calculations necessary for the preparation of a technological process. There are many programs that simplify the work of technologists, such as Vertical, Compass-3D, Technologic, AutoCAD, but sometimes they are not enough. This is primarily due to a decrease in the size of parts, an increase in the complexity of their manufacture and increasing requirements for the quality of products, which directly affects the timing of the manufacture of parts and their cost. The combination of all these factors requires the development of existing ones and the creation of new engineering software.

The allowance calculation system presented in this article is designed to solve one of the tasks of technologists – determining the allowance for mechanical processing of parts.

Keywords: algorithm, tolerance, interoperable dimensions, allowance for machining parts, program.

REFERENCES

1. Automation of production [Electronic resource]. <https://www.expocentr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/?ysclid=m6mklv075543084715> (Accessed: 09/12/2024) (rus)
2. Automation of production processes [Electronic resource]. Data Start URL: <https://bercut.com/blog/technologies/avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-protsesov/?ysclid=m6gw3o1pox76874985> (Accessed: 09/12/2024) (rus)
3. Dronov V.D., Automation of machine-building industries in conditions of multi-nomenclature serial production. [Avtomatizaciya mashinostroitel'nykh proizvodstv v usloviyah mnogonomenkla-turnogo serijnogo proizvodstva]. Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician Mikhail Fedorovich Reshetnev, General Designer of Rocket and Space Systems. 2024. Pp. 552–554. (rus)
4. Radkevich Y.M., Timiryazev V.A., Shirladze A.G., Ostrovskiy M.S. Calculation of allowances and intermediate sizes in mechanical engineering. [Raschet pripuskov i mezhperehodnih razmerov v mashinostroenii: Ucheb. posob. dlya mashinostroit. spec. vuzov]. Moscow: Publishing house "Higher School", 2004. 272 p. (rus)
5. Borisov V.B., Borisov E.I., Vasil'ev V.N., Volchkevich L.I., Vorob'ev Yu.A., Gajgal I.V., Kalashnikov A.S., Kalashnikov S.N., Kalinin M.A., Kalinin M.M., Kapustin N.M., Kacev P.G., Kovalev V.K., Kozunko B.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov A.I., Meshcheryakov K.R., Meshcheryakov R.K., Naerman M.S., Novi-kov A.N., Orlov P.N., Panov A.A., Popov E.A., Ryzhov E.V., Sizenov L.K., Starodubov V.S., Suhov M.F., Frumin Yu.L., Cejtlin L.B., Shemetov M.G. Manual technologist machine builder in two volumes. Vol.1 [Spravochnik tekhnologa mashinostroitelya v dvuh tomah. Tom 1.] Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Meshcheryakova. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1986. 656 p. (rus)
6. Gridnev V.N., Doschatov V.V., Zamalin V.S., Zhdanov A.I., Isachenko V.K., Malov A.N., Orlov P.N., Panchenko K.P., Rozhdestvensky L.A., Stasiunas A.P., Shachnev Yu.A., Schneider Yu.G., Yakushev A.I. Manual technologist machine builder in two volumes. Vol. 2. [Spravochnik tekhnologa mashinostroitelya v dvuh tomah. Tom 2.] Pod red. A.N. Malova. M.: Mashinostroenie, 1973. 568 p.
7. Bondarenko N.V. Automated system for calculating allowances for machining parts. [Avtomatizirovannaya sistema rascheta pripuskov na mehanicheskuyu obrabotku detalei]. Vologda: Infra-Injeneriya, 2023. 132 p. (rus)
8. Bondarenko N.V., Tatarintsev I.V., Vshivkov F.I. Ontology of allowances for mechanical processing of parts. [Ontologiya pripuskov na mehanicheskuyu obrabotku detalei]. Modeling of energy-informational processes : IX National Scientific and practical conference with international participation. 2020. Pp. 97–100.
9. Pestretsov S.I., Altunin K.A., Sokolov M.V., Odnolko V.G. The concept of creating a computer-aided design system for cutting processes in mechanical engineering technology. [Konceptsiya sozdaniya sistemi avtomatizirovannogo proektirovaniya processov rezaniya v tehnologii mashinostroeniya]. Moscow. 2012. 212 p. (rus)
10. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Develop-

ment of an algorithm for calculating loading on mechanical equipment for the Python programming environment. [Razrabotka algoritma rascheta pripuska na mehanicheskuyu obrabotku detalei dlya sredi programmirovaniya Python]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2022. Vol. 28, No. 4. Pp. 674–684. (rus)

11. Altunin K.A., Pestretsov S.I. Evaluation of the possibility of using CAD/CAE/CAM systems in the design of cutting processes and metal-cutting machines. [Ocenka vozmojnosti primeniya CAD/CAE/CAM-sistem pri proektirovanii processov rezaniya i metalloreshushih stankov]. 2011. Pp. 347–348.

12. State Standart R 53464-2009. Castings of metals and alloys. Dimensional, weight and machining tolerances. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 62 p. (rus)

13. Industry-specific Standart 1 00022-80. Maximum size deviations from 0.1 to 10,000 mm and tolerances for the shape and location of surfaces not indicated in the drawing. Moscow,

Standartinform Publ., 1981. 24 p. (rus)

14. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Automated system for calculating the allowance for mechanical processing. Certificate of state registration of the computer program No. 2023663752. 2023.

15. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Module of the program for calculating the allowance for mechanical processing. Certificate of state registration of the computer program No. 2023663117. 2023.

16. Honin K.A., Ermolaev R.A. Improvement of the technological process in conditions of automated production. [Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa v usloviyah avtomatizirovannogo proizvodstva]. Young scientist. 2018. No. 25. Pp. 151–155.

17. Altunin K.A., Sokolov M.V. Application of neural networks for modeling the turning process. [Primenenie neironnih setey dlya modelirovaniya processa tokarnoy obrabotki]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 122–133.

Information about the author:

Bondarenko, Nikita V. Postgraduate student. E-mail: nikbon.2015@yandex.ru. Tambov State Technical University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Tatarincev, Ilya V. Postgraduate student. E-mail: tatarintzew.ilya2012@yandex.ru. Tambov State Technical University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Sokolov, Michael V. DSc, Professor. E-mail: msok68@mail.ru. Tambov State Technical University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Received 05.08.2024

Для цитирования:

Бондаренко Н.В., Татаринцев И.В., Соколов М.В. Система расчета припуска для механической обработки деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 112–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-112-121

For citation:

Bondarenko N.V., Tatarintsev I.V., Sokolov M.V. The allowance calculation system for machining parts. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 112–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-112-121

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132

***Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Аннотация. Шаровые барабанные мельницы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, в которых требуется высокая часовая производительность одного агрегата, достигающая нескольких сот тонн готового продукта – это горнорудная промышленность, энергетическая, химическая и промышленность строительных материалов. К настоящему времени габаритные размеры мельниц достигли своих пределов самая большая в мире мельница имеет диаметр 12 метров и длину барабана 36 метров, а ее производительность составляет 3000 тонн в час. Одним из основных направлений совершенствования мельниц является разработка таких конструкций внутримельничных устройств, которые повышали бы эффективность процесса измельчения в целом. Приведен краткий анализ конструкций шаровых барабанных мельниц, эффективность процесса измельчения. Описана конструкция предлагаемой авторами футеровки, состоящей из стандартных плит, в которых сделаны поперечные желоба диаметр желобов соответствует диаметру мелющих тел, находящихся на данном участке барабана мельницы. Диаметр желобов от загрузки к выгрузке уменьшается. Показано взаимодействие футеровки с мелющими телами и ее способность предотвращать поперечную и продольную сегрегацию мелющих тел. В ходе поисковых экспериментов выявлены основные факторы, влияющие на классификацию мелющих тел. К таким факторам относятся: коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами; частота вращения барабана мельницы; глубина пазов футеровки; количество выступов в пазах футеровки. В качестве параметров оптимизации были выбраны: производительность мельницы; потребляемая мощность привода; удельный расход энергии; остаток на сите 008; удельная поверхность готового продукта. Приведены результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии и графиков. Проведен всесторонний анализ влияния исследуемых факторов и эффектов взаимодействия на формирование величин функций отклика и эффективность процесса измельчения в целом. Для выявления рациональных конструктивно-технологических параметров шаровой барабанной мельницы и режимов ее работы были совместно рассмотрены зависимости производительности мельницы и удельного расхода энергии от основных ее факторов. Установлены рациональные режимы работы шаровой барабанной мельницы, оснащенной новой конструкцией футеровки.

Ключевые слова: шаровая мельница, мелющие тела, сегрегация, измельчаемый материал.

Введение. Шаровые барабанные мельницы (ШБМ) нашли широкое применение во многих отраслях промышленности – в горнорудной при помолу руд черных и цветных металлов, в энергетической при помолу угля, в химической при помолу различных минералов, в производстве цемента при помолу сырья, клинкера и добавок. Существенным преимуществом ШБМ является простота конструкции, высокая часовая производительность, достигающая тысяч тонн в час готового продукта и возможность осуществлять процесс измельчения при различных способах помола – по сухому, по мокрому и с одновременной сушкой [1–5]. Они могут работать в открытом, замкнутом, многоступенчатом циклах измельчения, что позволяет учитывать физико-механические свойства измельчаемого материала и обеспечивать требования к качеству готового продукта. В мировой практике доля ШБМ наряду с другими помольными агрегатами превышает

80 %. Однако они обладают и существенными недостатками главным, из которых является весьма низкий КПД (коэффициент полезного действия), который не превышает 5 % [6–10]. Несмотря на эти недостатки, по мнению отечественных и зарубежных экспертов, в обозримом будущем ШБМ останутся основным помольным агрегатом при крупнотоннажном производстве. В связи с этим проблема совершенствования конструкций ШБМ, с целью повышения эффективности их работы является актуальной [11–14].

Материалы и методы. Все известные конструкции ШБМ представляют собой полный цилиндрический барабан на 30–35 % заполнен мелющими телами чаще все шарами диаметром 40–110 мм. Также в качестве мелющих тел используются металлические пруты диаметром 80–100 мм и длиной до 6 м, цельпечбс – металлические цилиндры диаметром 28–40 мм и длиной до 45 мм. Кроме этого, в керамическом и производстве используется речная галька и шары из циркония.

Процесс измельчения осуществляется следующим образом. При вращении барабана мельницы мелющие тела под воздействием центробежной силы поднимаются на определенную высоту и падают, измельчая материал ударом, раздавливанием и истиранием. В ШБМ для измельчения должны подаваться куски материала размером до 50 мм. Однако на практике это не всегда выдерживается и в мельницу зачастую попадают куски размером до 300 мм. Безусловно это приводит к нарушению технологического регламента и снижению качества готового продукта. Для более эффективного процесса измельчения с учетом того, что в мельницу поступают куски материала различной крупности в барабан мельницы одновременно загружают набор мелющих тел размером от 40 до 110 мм. Целесообразно чтобы в процессе работы наиболее крупные мелющие тела находились в начале барабана мельницы и во внешнем слое загрузки куда поступают исходные крупные куски материала. Однако на

практике происходит сегрегация мелющих тел. Крупные мелющие тела перемещаются в центральную часть загрузки и к выходу из помольной камеры, т. е. происходит то, что крупные куски в начале барабана мельницы измельчаются мелкими шарами, а в конце помольной камеры мелкие частицы измельчаются крупными шарами. Это существенно снижает эффективность процесса измельчения в целом – загрубляется готовый продукт, снижается производительность мельницы и как следствие повышается удельный расход энергии. С целью предотвращения сегрегации мелющих тел внутренняя поверхность барабана мельницы футеруется плитами различной конструкции, которые призваны существенно снизить сегрегацию мелющих тел.

Нами разработана принципиально новая конструкция футеровки, которая обеспечивает как поперечную, так и продольную классификацию мелющих тел предотвращает их сегрегацию [15–17].

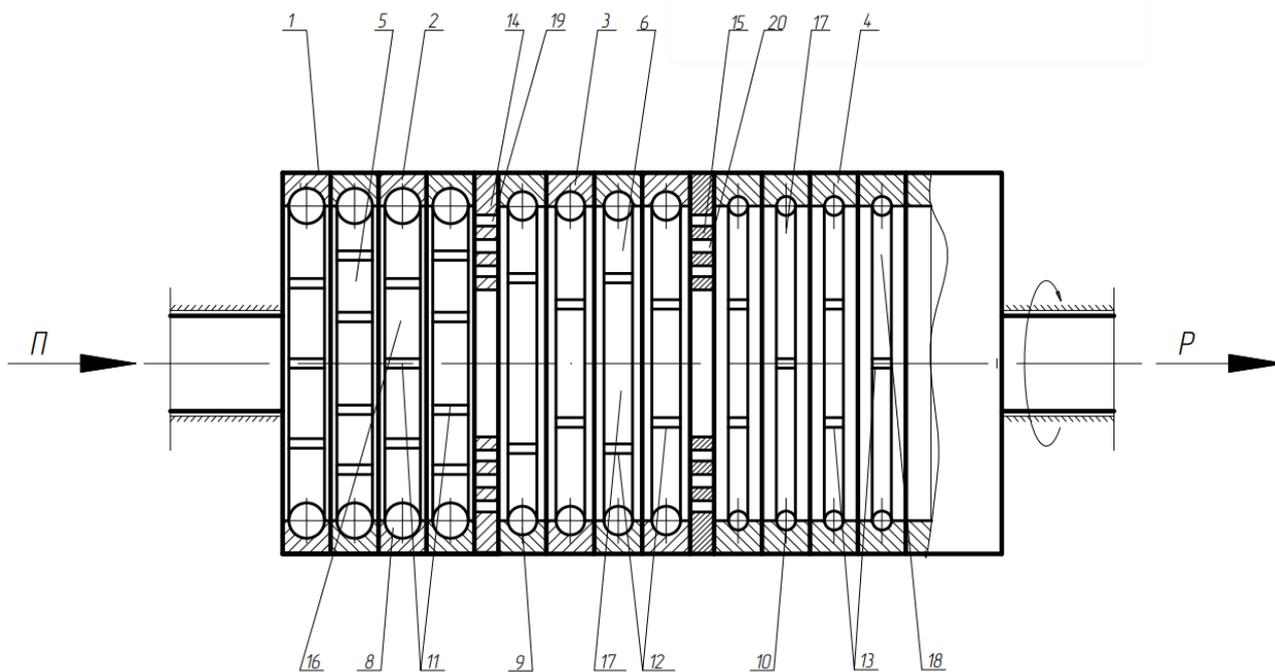


Рис. 1. Продольное сечение барабана мельницы с предлагаемой конструкцией футеровки

1 – корпус мельницы (барабан); 2, 3, 4 – бронеплиты; 5, 6, 7 – желоба; 8, 9, 10 – мелющие тела; 11, 12, 13 – выступы в желобах; 14, 15 – перфорированные поперечные кольца; 16, 17, 18 – секции; 19, 20 – сквозные щели в поперечных кольцах.

На рис.1 представлено продольное сечение барабана ШБМ, в котором установлена разработанная нами футеровка. Особенность предлагаемой конструкции ШБМ заключается в том, что внутренняя поверхность цилиндрического корпуса 1 футеруется бронеплитами 2, 3, 4, на поверхности которых выполнены соответствующие желоба 5, 6, 7 глубиной равной 0,4–0,5 диаметра шара. В желобах 5, 6, 7 выполнены выступы, соответственно, 11, 12, 13, высота которых равна

0,6–0,7 диаметра шара, находящегося в соответствующей секции 16, 17, 18, образованных между перфорированными кольцами 14, 15. В каждом из желобов 5, 6, 7 помещаются мелющие тела (шары) 8, 9, 10 соответствующего диаметра. Расстояние Л, М, Н между перфорированными кольцами пропорционально массе мелющих тел, находящихся на данном участке барабана мельницы. Размер мелющих тел уменьшается от загрузки к выгрузке по ходу процесса измельчения.

ШБМ работает следующим образом. Измельчаемый материал, клинкер вращающихся печей, подается в направлении П через полую загрузочную цапфу в секцию 16 помольной камеры мельницы, в которой подпадают под воздействие самых крупных мелющих тел 8, находящихся в желобах 5 и перемещаемых в поперечном сечении барабана и измельчают частицы материала преимущественно ударом. По мере измельчения частицы материала проходят через отверстия 19 в перфорированном кольце 14 поступают в секцию 17 и подвергаются последующему измельчению мелющими телами 9 меньшего диаметра находящимися в желобах 6. Измельчение материала в этой секции происходит в комбинированном режиме – частично ударом и истиранием. Далее частицы измельчаемого материала перемещаются через отверстия 20 в перфорированном кольце 15, поступают в секцию 18 с мелющими телами 10 меньшего диаметра. Их измельчение осуществляется в режиме раздавливания и истирания. Готовый продукт разгружается через полую разгрузочную цапфу в направлении Р. В каждом из желобов 5, 6, 7 имеются выступы 11, 12, 13, посредством которых мелющие тела поднимаются на заданную высоту. В секции 16 высота подъема мелющих тел 8 максимальная, в секции 17 высота подъема мелющих тел 10 минимальная.

Такое конструктивное выполнение футеровки с желобами различного диаметра и выступами обеспечивает распределение мелющих тел по размерам вдоль продольной оси барабана мельницы и предотвращает как поперечную, так

и продольную их сегрегацию, что существенно повышает эффективность процесса измельчения.

Определение рациональных конструктивных параметров и режимов процесса измельчения в ШБМ, оснащенной новой конструкцией футеровки осуществлялось в экспериментальной установке $0,32 \times 1,5$ м, работающей в периодическом и открытом цикле измельчения. В качестве мелющих тел использовались шары диаметром 12–20 мм, а измельчению подвергался клинкер размером 1–0,63 мм.

Экспериментальные исследования проводились по полнофакторному плану ЦКРП 2^4 . В ходе поисковых экспериментов определены основные факторы, влияющие на эффективность процесса измельчения: коэффициент загрузки мелющими телами x_1 (ϕ); частота вращения барабана мельницы x_2 (n); глубина пазов футеровки x_3 (h); количество выступов в пазах футеровки x_4 (z). В качестве параметров оптимизации были выбраны – производительность мельницы $Y_1(Q)$; потребляемая мощность привода $Y_2(P)$; удельный расход энергии $Y_3(q)$; остаток на сите 008 $Y_4(R)$; удельная поверхность $Y_5(S)$.

Коэффициент загрузки мелющими телами регулировался в пределах 0,05–0,40; частота вращения барабана мельницы регулировалась в пределах 0,08–0,95 c^{-1} ; глубина пазов футеровки от 3 до 14мм; количество выступов футеровки 2–10 шт.

В ходе реализации и обработки результатов экспериментов нами были получены уравнения регрессии в кодированном виде:

Производительность:

$$Y_1(Q) = 23,726 + 0,837X_1 + 0,229X_2 - 1,625X_3 + 0,521X_4 - 0,615X_1X_2 + 0,809X_1X_3 + 0,641X_1X_4 - 0,503X_2X_3 - 0,444X_2X_4 - 0,781X_3X_4 - 0,269X_1^2 + 0,256X_2^2 + 1,319X_3^2 + 0,606X_4^2 \quad (1)$$

Потребляемая мощность:

$$Y_2(P) = 1,563 + 0,297X_1 + 0,049X_2 + 0,021X_3 - 0,043X_4 - 0,013X_1X_2 + 0,082X_1X_3 - 0,010X_1X_4 + 0,025X_2X_3 + 0,009X_2X_4 - 0,023X_3X_4 - 0,002X_1^2 - 0,018X_2^2 + 0,024X_3^2 + 0,08X_4^2 \quad (2)$$

Удельный расход энергии:

$$Y_3(q) = 66,091 + 10,583X_1 + 1,495X_2 + 5,476X_3 - 3,553X_4 + 0,856X_1X_2 + 0,977X_1X_3 - 1,717X_1X_4 + 2,735X_2X_3 + 1,459X_2X_4 + 1,693X_3X_4 + 0,323X_1^2 - 1,136X_2^2 - 3,516X_3^2 - 1,679X_4^2 \quad (3)$$

Остаток на сите 008:

$$Y_4(R_{008}) = 3,405 - 0,363X_1 - 0,956X_2 + 2,430X_3 + 0,205X_4 + 1,419X_1^2 + 0,109X_2^2 + 1,567X_3^2 + 1,143X_4^2 - 0,054X_1X_2 + 1,603X_1X_3 + 0,303X_1X_4 - 0,621X_2X_3 - 0,381X_2X_4 + 0,324X_3X_4 \quad (4)$$

Удельная поверхность:

$$Y_5(S) = 2483,11 - 10,37X_1 - 158,91X_2 - 336,58X_3 - 18,15X_4 - 115,36X_1^2 - 115,39X_2^2 + 12,28X_3^2 - 11,42X_4^2 - 5,71X_1X_2 - 96,24X_1X_3 + 37,30X_1X_4 + 17,96X_2X_3 + 50,40X_2X_4 + 115,93X_3X_4 \quad (5)$$

Анализ величины и знаков коэффициентов при факторах и эффектах взаимодействия в уравнениях регрессии (1)–(5) позволяет определить влияние каждого из них на формирование величины соответствующего параметра оптимизации.

Наибольшее влияние на увеличение производительности (1) мельницы оказывают коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами, количество выступов на футеровке и частота вращения барабана мельницы. С их увеличением производительность мельницы возрастает. Это очевидно. А увеличение глубины пазов приводит к снижению производительности, так как шары начинают выпадать из пазов и это приводит к нарушению режима движения мелющих тел, их сегрегации и снижает эффективность процесса измельчения в целом. Сравнивая величину коэффициентов в уравнении (1), можно сделать вывод о том, что наряду с основными факторами существенное влияние на формирование функции отклика вносят эффекты взаимодействия X_1X_3 , X_1X_4 . Причем суммарная абсолютная величина коэффициентов при факторах X_1 , X_2 , X_3 , X_4 составляет 0,038, а при эффектах взаимодействия этих факторов – 0,278, т.е. в 7,3 раза больше.

Аналогичные выводы можно сделать и в отношении уравнения (2). Величина потребляемой мощности зависит в большей мере от величины коэффициента загрузки мелющими телами, частоты вращения барабана мельницы и глубины пазов в футеровке. При этом эффекты взаимодействия факторов в меньшей степени влияют на формирование величины функции отклика. Суммарная величина коэффициентов при факторах равна 0,324, а при соответствующих эффектах взаимодействия 0,094, т.е. в 3,44 раза меньше.

Удельный расход энергии определяется как отношение потребляемой мощности привода к производительности мельницы и он определяется по уравнению регрессии (3). Этот параметр зависит от параметров (1) и (2) и он характеризует эффективность процесса измельчения. Рациональным является такой режим работы мельницы, при котором производительность мельницы по готовому продукту стремится к максимуму, а потребляемая мощность привода к минимуму. Хотя известно, что максимальная производительность мельницы пропорциональна потребляемой мощности привода. А именно, чем больше производительность мельницы, тем больше величина потребляемой мощности. Этот вывод является базовым и на практике необходимо стремиться к снижению удельного расхода энергии, в большей мере, за счет повышения эффективности процесса измельчения, путем ин-

тенсификации движения мелющих тел, предотвращения их поперечной и продольной сегрегации, обеспечения внутримельничной классификации измельчаемого материала.

Качество готового продукта характеризуется размером частиц, который контролируется остатком на контрольном сите с размером ячеек 80 мкм (4) и их удельной поверхностью (5). Величина коэффициентов (4), их знаки позволяют сделать вывод о том, что с увеличением коэффициента загрузки и частоты вращения барабана мельницы остаток на сите 008 снижается т.е. качество помола улучшается – этот вывод очевиден. А с увеличением глубины пазов и количества выступов в пазах помол грубеется. Это можно объяснить тем, что большая часть мелющих тел работает в водопадном ударном режиме измельчения, что снижает эффективность процесса измельчения. Суммарная величина коэффициентов при факторах равна 1,316, а при эффектах взаимодействия 0,375, т.е. в 3,5 раза меньше. Эффекты взаимодействия в данном случае оказывают существенно меньшее влияние на формирование функции отклика, чем сами факторы.

Что касается уравнения (5) – удельной поверхности частиц готового продукта то величина удельной поверхности, в данном случае, зависит от размера частиц готового продукта, т.е. чем меньше размер частиц, тем больше удельная поверхность готового продукта. Отрицательные знаки при всех факторах в уравнении (5) говорят о том, что увеличение любого из факторов приводит к снижению удельной поверхности готового продукта, а за счет эффектов взаимодействия удельная поверхность возрастает. Разница между величиной коэффициентов в первой степени и эффектами взаимодействия составляет 0,11, т.е. 0,03 %, что не существенно. Таким образом, формирование величины функции отклика (5) в равной мере обеспечивается как факторами, так и их эффектами взаимодействия.

На рис. 2, рис. 3, рис.4 представлены графические зависимости, отражающие наиболее характерные результаты экспериментальных исследований.

Минимальная производительность мельницы 19 кг/ч (рис. 2, б) соответствует минимальному коэффициенту загрузки, равному 0,2, глубине пазов равным 11 мм, при этом увеличение коэффициента загрузки до 0,4 обеспечивает повышение производительности мельницы до 25,5 кг/ч. Максимальная производительность мельницы (рис. 2, в) 26,9 кг/ч достигается при коэффициенте загрузки барабана 0,4 и количестве выступов в футеровке – 8 шт. Во всех случаях при всех режимах работы мельницы характер кривых (рис. 2) монотонно возрастающий, т.е. с

увеличением коэффициента загрузки производительность мельницы увеличивается в среднем на 27,6 %.

Зависимости удельного расхода энергии от глубины пазов в футеровке носит экстремальный характер (рис. 3) с точкой экстремума в районе,

соответствующем глубине паза – 11мм. Минимальный расход энергии 31кВт.ч/т наблюдался при глубине пазов 2мм, количестве выступов – 8шт. Максимальный расход энергии 80кВт.ч/т соответствует режиму работы мельницы: глубина пазов 11мм, коэффициент загрузки 0,35 (рис. 3, б).

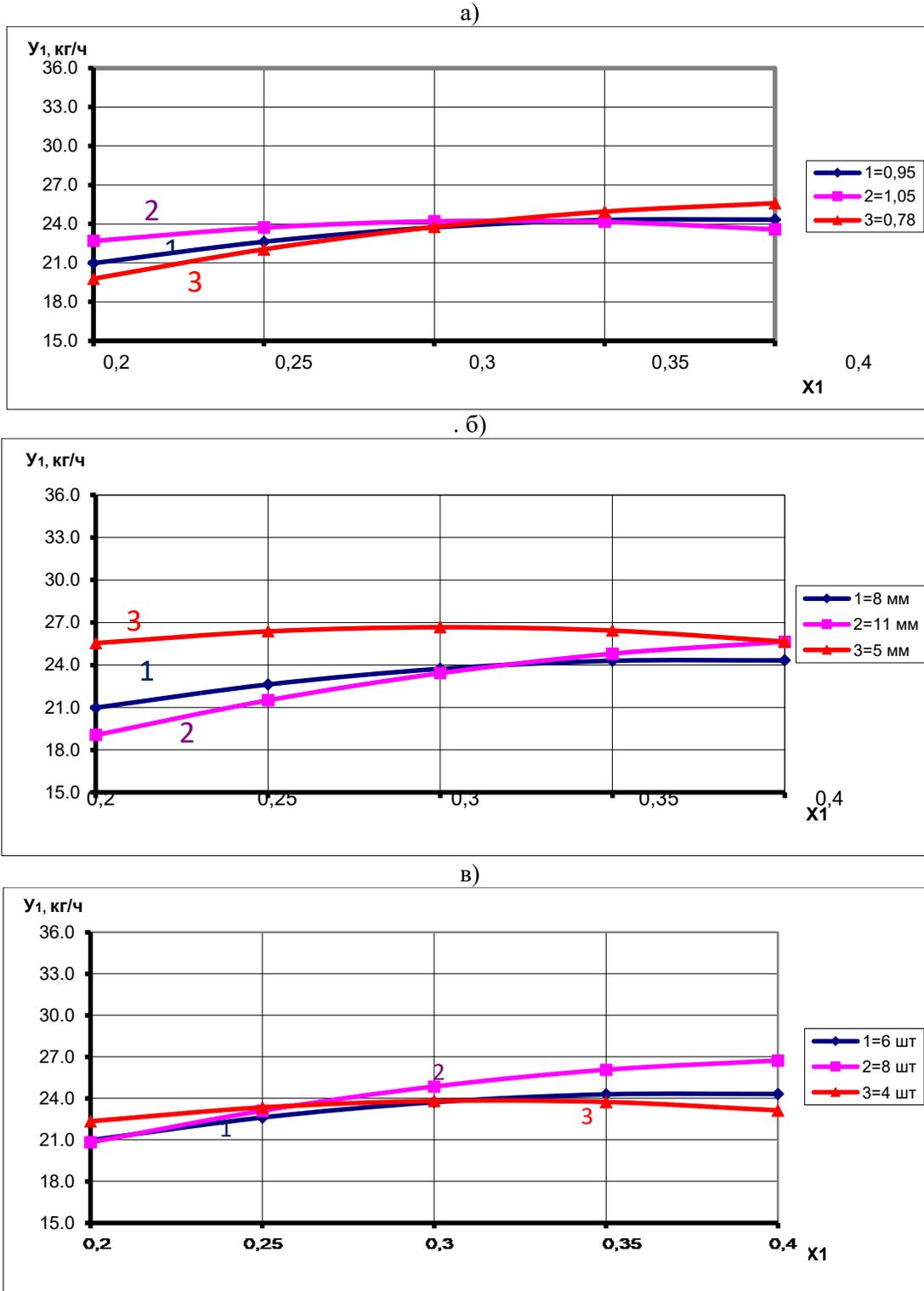


Рис. 2. Зависимость производительности $U_1(Q)$ от коэффициента загрузки барабана мельницы X_1 а) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2 . 1 – 0,95 c^{-1} ; 2 – 1,05 c^{-1} ; 3 – 0,78 c^{-1} ; б) при различной глубине пазов X_3 . 1 – 8 мм; 2 – 11 мм; 3 – 5 мм; в) при различном количестве выступов X_4 . 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт.

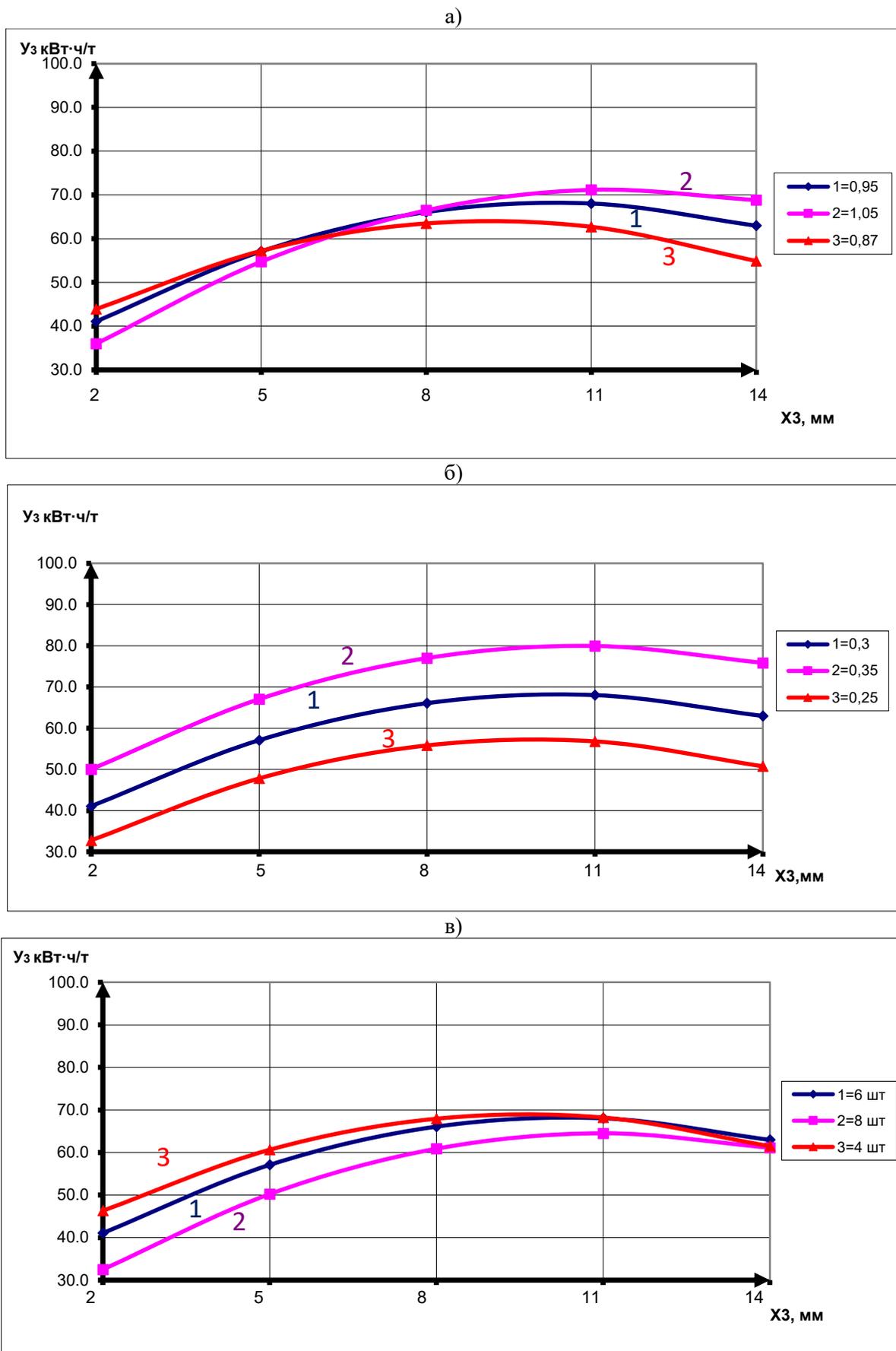


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии $У_3$ от глубины пазов X_3
 а) при различном коэффициенте загрузки барабана мельницы X_1 1 – 0,3; 2 – 0,35; 3 – 0,25;
 б) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2 1 – 0,95 с⁻¹; 2 – 1,05 с⁻¹; 3 – 0,78 с⁻¹;
 в) при различном количестве выступов X_4 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт

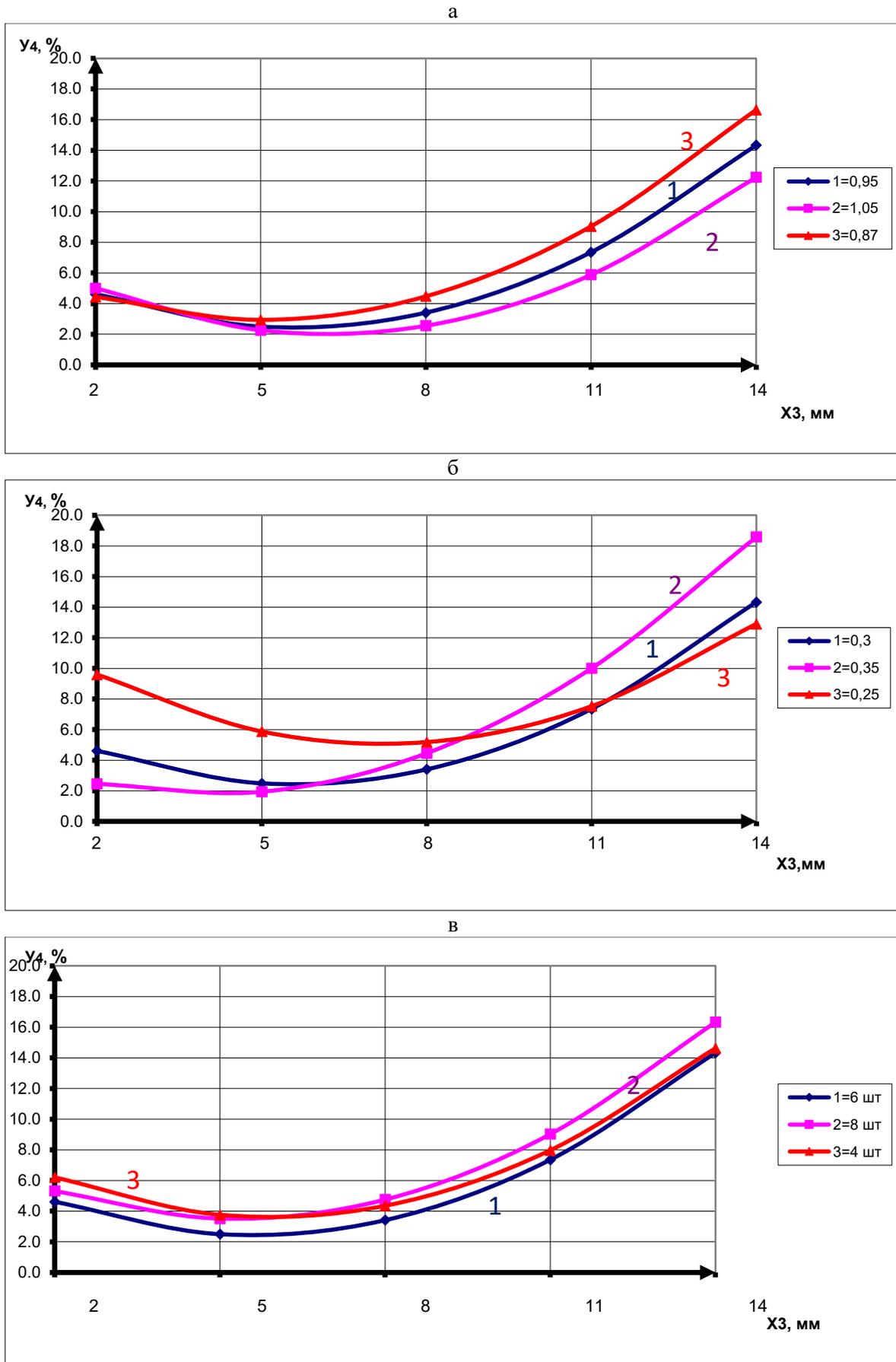


Рис. 4. Зависимость остатка на сите 008 от глубины пазов X_3
 а) при различном коэффициенте загрузки барабана мельницы X_1 . 1 – 0,3; 2 – 0,35; 3 – 0,25;
 б) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2 . 1 – 0,95 c^{-1} ; 2 – 1,05 c^{-1} ; 3 – 0,78 c^{-1} ;
 в) при различном количестве выступов X_4 . 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт

Зависимость тонкости помола от глубины пазов в футеровке при всех режимах работы мельницы также носит экстремальный характер в зоне минимума, характеризуемой глубиной пазов в футеровке – 5мм (рис. 4). Например, при глубине паза 2 мм, коэффициенте загрузки 0,35 остаток на сите 008 составляет 2,0 %, а с увеличением глубины паза до 14мм помол загрубляется и остаток на сите 008 возрастает до 18 % (рис. 4, б). Это объясняется тем, что самые крупные мелющие тела удерживаются в глубоких пазах и интенсивно перемещаются в водопадном режиме измельчая частицы материала преимущественно ударом. Для получения тонкомолотого материала целесообразно использовать режим работы мельницы, представленный на графике рис.4, в – глубина пазов должна быть в пределах 2–8 мм, количество выступов в пазах 4–6 шт, коэффициент загрузки барабана мельницы 0,35.

Уравнения регрессии (2)–(4), полученные в результате многофакторного эксперимента, позволяют установить рациональные значения параметров X_1, X_2, X_3, X_4 , при которых процесс измельчения происходит наиболее эффективно. Однако определение рационального режима работы шаровой барабанной мельницы представляет собой совместный анализ полученных зависимостей функций отклика от варьируемых факторов, которые необходимо рассматривать совместно, т.к. их общее взаимодействие дает наиболее полное представление о процессах, происходящих в мельнице, возможность их контроля и регулирования.

Для выявления рациональных конструктивно – технологических параметров шаровой барабанной мельницы были рассмотрены совместные зависимости производительности, удельного расхода энергии, остатка на сите 008, удельной поверхности от коэффициента загрузки, частоты вращения барабана мельницы,

глубины пазов в футеровке и количества выступов в пазах футеровки.

$$(Q, G, R_{008}, S) = f(X_1, X_2, X_3, X_4). \quad (6)$$

К каждой из функций отклика предъявлялись следующие требования:

$$Q > \max; q > \min; R_{008} > \min; S > \max. \quad (7)$$

Максимальные значения производительности мельницы $Q = 34,9$ кг/ч регистрируются при факторах $X_1 = 0,3, X_2 = 0,95 \text{ с}^{-1}, X_3 = 2\text{мм}, X_4 = 8$ шт (рис. 5). Следует отметить что при данных параметрах работы мельницы значения удельной поверхности измельчаемого материала S составили $2943,96 \text{ см}^2/\text{г}$, значения мощности P составили $1,7$ кВт, удельных энергозатрат q составили $32,49 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, а остаток на сите 008 составил $5,31 \%$.

Из приведенных на рис. 5 графических зависимостей следует, что максимальная производительность $Q = 33,7$ кг/ч достигается при уровнях факторов $X_1 = 0,3, X_2 = 1,05 \text{ с}^{-1}, X_3 = 2\text{мм}, X_4 = 6$ шт. Следует отметить, что при данных параметрах работы мельницы значения удельной поверхности измельчаемого материала составила $S = 2895,17 \text{ см}^2/\text{г}$, потребляемая мощность $P = 1,6$ кВт·ч, удельные энергозатраты $g = 35,96 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, остаток на сите 008 $R_{008} = 5 \%$.

На основании проведенных экспериментальных исследований, анализа полученных результатов в виде уравнений регрессии и графических зависимостей нами были определены рациональные технологические и конструктивные параметры работы шаровой барабанной мельницы, оснащенной разработанной нами футеровкой: коэффициент загрузки барабана мельницы $0,30–0,35$; частота вращения барабана мельницы $0,95–1,05 \text{ с}^{-1}$; глубина пазов в футеровке $5–11\text{мм}$; количество выступов $6–8$ шт.

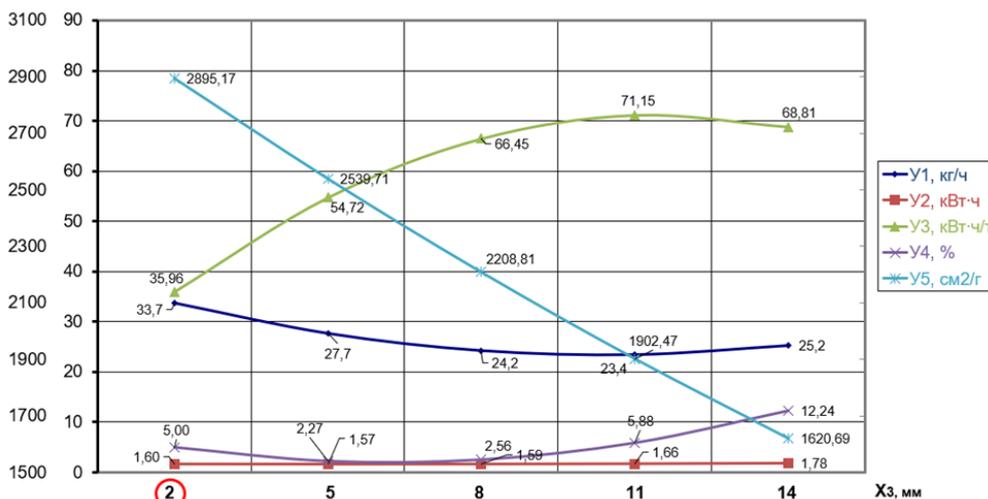


Рис. 5. График зависимостей функций отклика U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 от X_3 – высоты выступов

Выводы. Проведенная нами работа по совершенствованию футеровки шаровой барабанной мельницы показала возможность существенно повысить эффективность процесса измельчения за счет принудительной классификации мелющих тел, которая исключает их поперечную и продольную сегрегацию. Такой тип футеровки может быть использован как при сухом, так и при мокром способе измельчения в мельницах, работающих по открытому и замкнутому циклах измельчения.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта № 22 – 29 – 01438 поддержанного Российским научным фондом с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение, и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 285 с.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. Богданов В.С. Теоретические основы расчета усовершенствованных конструкций шаровых барабанных мельниц. Старый Оскол: ТНТ, 2023. 360 с.
4. Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
5. Крюков Д.К. Футеровка шаровых мельниц. М.: Недра, 1966. 174 с.
6. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Хахале П.А. Оптимизация энергоэффективности футеровки шаровых барабанных мельниц // Цемент и его применение. 2021. №4. С. 38–41.
7. Воробьев Н. Д., Богданов В.С., Ельцов М.Ю. Математическая модель движения мелющих тел в барабанных мельницах. Общие принципы построения // Известия Вузов. Горный журнал. 1988. №8. С. 116–119.
8. Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П. Проектирование футеровки шаровых барабанных мельниц // Цемент и его применение. 2024. № 2. С.48–51.
9. Шувалов С.И., Михеев П.Г. Распределение мелющих тел и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана мельницы // Вестник ИГЭУ. 2019. Вып. 2. С. 1–7.
10. Хардер Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности // Цемент Известь Гипс. 2006. № 1. С. 24–38.
11. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie // ZKG International. 2013. №03. Pp. 31–42.
12. Jorgensen S.W. Cement grinding-a Comparison between Vertikal Roller Mill and Ball Mill // Cement International. 2015. №02. Pp. 45–58.
13. Harde J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie // ZKG International. 2023. №03. Pp. 31–42.
14. Stoiber W. Comminution Technology and Energy Consumption // Cemen International. 2023. Pp. 44–52.
15. А.с. 1316695 А1 (SU). Футеровка шаровой мельницы /Богданов В.С. и др. Опубл. в БИ. 1987. №22.
16. А.с. 2397813 (RU). Классифицирующая футеровка цементной мельницы / Богданов В.С. и др. Опубл. в БИ. 2010. № 24.
17. А.с. 1738341 А1 (SU). Футеровка трубной мельницы / Богданов В.С. и др. – Опубл. в БИ. 1992. № 21.

Информация об авторах:

Богданов Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сухоруков Илья Назимович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: x910363@jindex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Богданов Денис Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Несмеянов Николай Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: akademik.np@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.12.2024 г.

© Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П., 2025

***Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N. Bogdanov D.V. Nesmeyanov N.P.**

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

**E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com*

OPTIMIZATION OF GRINDING PROCESS IN BALL MILL DRUM MILL

Abstract. *Ball drum mills have found wide application in many industries, where high hourly productivity of one unit is required, reaching several hundred tons of finished product - mining, energy, chemical and building materials industries. To date, the overall dimensions of mills have reached their limits, the world's largest mill has a diameter of 12 meters and a drum length of 36 meters, and its capacity is 3000 tons per hour. One of the main directions of improvement of mills is the development of such designs of inner-mill devices, which would increase the efficiency of the grinding process as a whole. A brief analysis of the design of ball drum mills, the efficiency of the grinding process is given. The authors describe the design of the lining proposed by the authors, which consists of standard plates, in which made transverse chutes diameter of chutes corresponds to the diameter of the grinding bodies, which are in this section of the drum of the mill. The diameter of the chutes decreases from loading to unloading. The interaction of lining with grinding bodies and its ability to prevent transverse and longitudinal segregation of grinding bodies is shown. In the course of search experiments the main factors influencing the classification of grinding bodies were revealed. These factors include: the coefficient of loading of the mill drum with grinding bodies; the rotation speed of the mill drum; the depth of the grooves of the lining; the number of projections in the grooves of the lining. As optimization parameters were chosen: mill productivity; power consumption of the drive; specific energy consumption; residue on sieve 008; specific surface of the finished product. The results of experimental studies in the form of regression equations and graphs are given. A comprehensive analysis of the influence of the studied factors and interaction effects on the formation of response function values and the efficiency of the grinding process as a whole has been carried out. For revealing of rational design and technological parameters of the ball drum mill and modes of its operation the dependences of mill productivity and specific energy consumption on its main factors have been jointly considered. Rational modes of operation of the ball drum mill equipped with a new design of lining have been established.*

Keywords: *ball mill, grinding bodies, segregation, grinding material*

REFERENCES

1. Sergo E.E. Crushing, grinding, and screening of minerals [Droblenie, izmel'chenie, i grohochenie poleznyh iskopaemyh]. Moscow : Nedra, 1985. 285 p. (rus)
2. Sidenko P.M. Shredding in the chemical industry [Izmel'chenie v himicheskoy promyshlennosti]. Moscow: Chemistry, 1977. 368 c. (rus)
3. Bogdanov V. S. Theoretical bases of calculation of the improved designs of ball drum mills [Teoreticheskie osnovy rascheta usovershenstvovannykh konstrukcij sharovyh barabannyh mel'nic]. Stary Oskol : TNT, 2024. 360 c. (rus)
4. Perov V.A. Crushing, grinding and screening of skid fossils [Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh]. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (rus)
5. Kryukov D.K. Lining of ball mills [Futerovka sharovyh mel'nic]. Moscow: Nedra, 1966. 174 c. (rus)
6. Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Bogdanov D.V., Khakhale P.A. Optimization of Energy Efficiency of Ball Drum Mill Lining [Optimizaciya energoeffektivnosti futerovki sharovyh barabannyh mel'nic]. Cement and its Application. 2021. No.4. Pp. 38–41. (rus)
7. Vorob'ev N. D., Bogdanov V.S., Eltsov M. Yu. Mathematical model of grinding bodies motion in drum mills. General principles of construction [Matematicheskaya model' dvizheniya melyushchih tel v barabannyh mel'nicah. Obshchie principy postroeniya]. Izv. Vuzov. Mining Journal. 1988. No.8. Pp. 116–119. (rus)
8. Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N., Bogdanov D.V., Nesmeyanov N.P. Designing the lining of ball drum mills [Proektirovanie futerovki sharovyh barabannyh mel'nic]. Cement and its application. 2024. No.2. Pp. 48–51. (rus)
9. Shuvalov S.I., Mikheev P.G. Distribution of grinding bodies and grinding material in the cross-section of the rotating mill drum [Raspredelenie melyushchih tel i razmalyvaemogo materiala v poperechnom sechenii vrashchayushchegosya barabana mel'nicy]. Vestnik IHEU. 2019. Vol.2. Pp. 1–7. (rus)
10. Harder J. Development of one-stage grinding processes in cement industry [Razvitie odnoetapnykh processov izmel'cheniya v cementnoj promyshlennosti]. Cement Lime Gypsum. 2006. No.1. Pp. 24–38. (rus)
11. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie. ZKG International. 2013. No.03. Pp. 31–42.
12. Jorgensen S.W. Cement grinding-a Comparison between Vertikal Roller Mill and Ball Mill. Cement International. 2015. No. 02. Pp. 45–58.

13. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie. ZKG International. 2023. No. 03. Pp. 31–42.

14. Stoiber W. Comminution Technology and Energy Consumption. Cement International. 2023. No. 02. Pp. 44–52.

15. A.c. 1316695 A1 (SU). Lining of a ball mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 1987, No. 22

16. A.c.2397813 (RU), Classifying lining of a cement mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 2010, No. 24.

17. A. c. 1738341 A1 (SU). Lining of a tube mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 1992, No. 21

Information about the authors

Bogdanov, Vasily S. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Sukhorukov, Ilya N. Postgraduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: x910363@jindex.ru. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Bogdanov, Denis V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Equipment Department. E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Nesmeyanov, Nikolay P. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Equipment. Mechanical equipment. E-mail: akademik.np@mail.ru. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Received 10.12.2024

Для цитирования:

Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П. Оптимизация процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 122–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132

For citation:

Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N., Bogdanov D.V., Nesmeyanov N.P. Optimization of grinding process in ball mill drum mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 122–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-133-144

¹Большаков Г.С., ²*Тарасов Д.А.¹Пензенский государственный университет²Пензенский государственный технологический университет

*E-mail: tda82@list.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЛНОВЫХ РЕДУКТОРОВ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ

Аннотация. В приводах поворота устройств ограничения доступа и безопасности находят широкое применение редукторы с относительно большим передаточным отношением 200...300 и крутящим моментом до 6000 Н·м. Предложение к применению в промышленности серийных червячных и планетарных редукторов с выходным моментом от 1000 Н·м весьма ограничено. Это особенно остро проявилось после сокращения номенклатуры редукторов зарубежного производства. Проектирование и изготовление специальных редукторов связано со значительными трудностями ввиду большого количества деталей планетарных редукторов и необходимостью наличия специализированного зуборезного оборудования. Альтернативой планетарным редукторам являются планетарно-цевочные и волновые редукторы с промежуточными телами качения. Волновые редукторы являются разновидностью широко известных планетарных приводов, преимуществом которых по сравнению с планетарными приводами является большее передаточное число в одной ступени. Проанализирована возможность применения стали с термической обработкой нормализация или улучшение для деталей со сложным профилем (жесткого колеса и сепаратора), при ограничении их твердости. Данная возможность позволяет использовать чистовое фрезерование этих деталей вместо дорогостоящих шлифовальных отделочных операций для повышения технологичности производства. Предложена методика определения размеров элементов зацепления волнового редуктора по критерию контактной прочности для пар: волнообразователь – ролик, ролик – жесткое колесо, ролик – сепаратор. Рассмотрена возможность определения допустимых контактных напряжений в зацеплении по методикам расчета зубчатых цилиндрических эвольвентных передач, что позволяет учитывать число эквивалентных циклов нагружения, твердость и шероховатость рабочих поверхностей, а также другие параметры.

Ключевые слова: волновой редуктор, промежуточные тела качения, контактные напряжения, твердость.

Введение. В приводах поворота устройств ограничения доступа и безопасности находят широкое применение редукторы с относительно большим передаточным отношением 200...300 и крутящим моментом до 6000 Н·м, что связано с большой инерционной нагрузкой исполнительных элементов.

Предложение к применению в промышленности серийных червячных и планетарных редукторов с выходным моментом от 1000 Н·м весьма ограничено. Данный факт особенно остро проявился после сокращения номенклатуры редукторов зарубежного производства. В свою очередь проектирование и изготовление специальных редукторов связано со значительными трудностями ввиду большого количества деталей планетарных редукторов и необходимостью наличия специализированного зуборезного оборудования с относительно большим диаметром обработки до нескольких сотен миллиметров для изготовления выходных ступеней.

Анализ размерного ряда зубодолбежных и зубофрезерных станков указывает на то, что обрабатываемый диаметр зубчатых колес

диаметром более 200 мм возможен на станках, относящихся к верхней части размерного ряда. Учитывая относительно небольшую потребность указанных изделий от единиц до сотен в год в рамках одного предприятия, дает сделать вывод о том, что приобретение дорогостоящего зуборезного оборудования не всегда рационально. Альтернативой планетарным редукторам являются планетарно-цевочные и волновые редукторы [1].

Волновые редукторы являются разновидностью широко известных планетарных приводов. Их существенным преимуществом по сравнению с планетарными приводами является большее передаточное число в одной ступени, которое может варьироваться согласно имеющимся данным от 9 до 64 [2]. Многоступенчатые волновые приводы могут компоноваться за счет сочетания ступеней передачи при осевом или коаксиальном расположении ступеней. При последнем внутренние ступени встраиваются во внешние. Увеличение передаточного отношения в одной ступени позволяет сократить количество ступеней по сравнению с планетарными

приводами, выпускаемыми в настоящее время [3]. Так, например, вместо четырех ступеней планетарного привода можно использовать две волновых ступени.

Зацепление одной ступени волнового редуктора с промежуточными телами качения состоит всего из трех элементов и стандартных, широко распространенных тел качения 1 (рис. 1) [4]:

- волнообразователь 2, являющийся входным звеном;
- жесткое неподвижное колесо с профилем сложной формы 3;
- сепаратор 4 установлен в двух опорах качения [5] и являющийся выходным звеном редуктора.

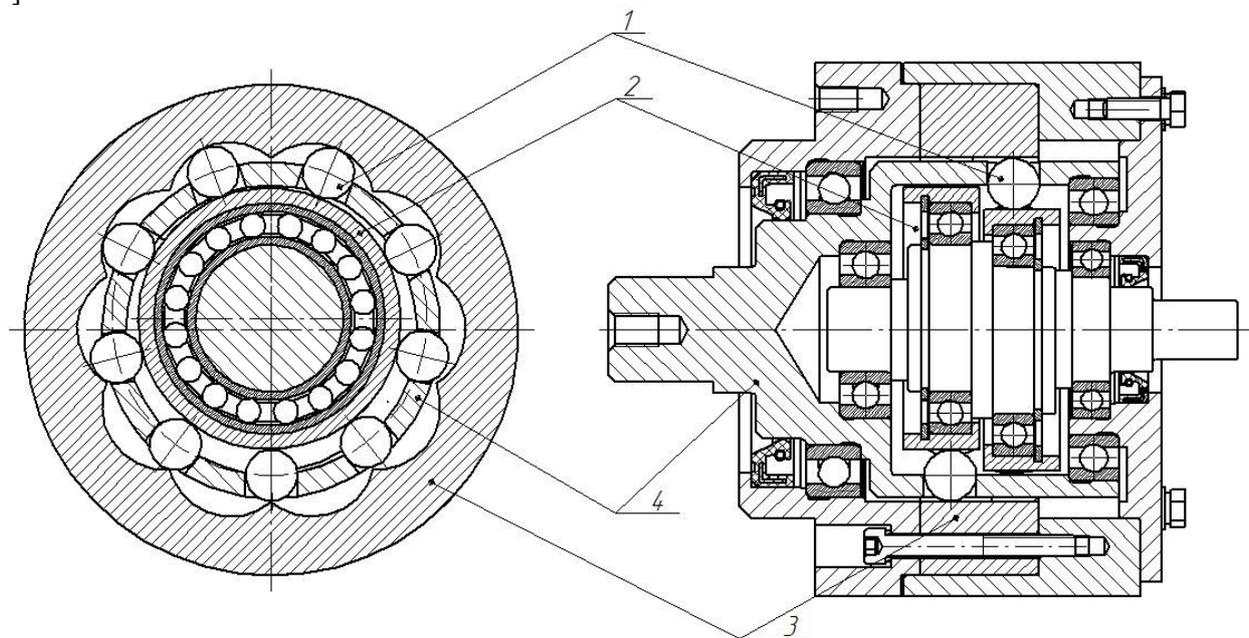


Рис. 1. Схема передачи с промежуточными телами качения

Наиболее сложные в изготовлении детали редуктора жесткое колесо и сепаратор, представленные на рисунках 2а и 3а а)

соответственно, обрабатываются на токарных и фрезерных станках с ЧПУ [6].

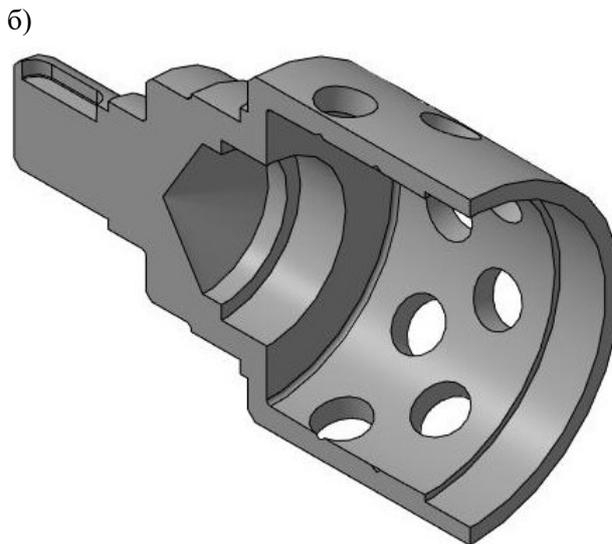
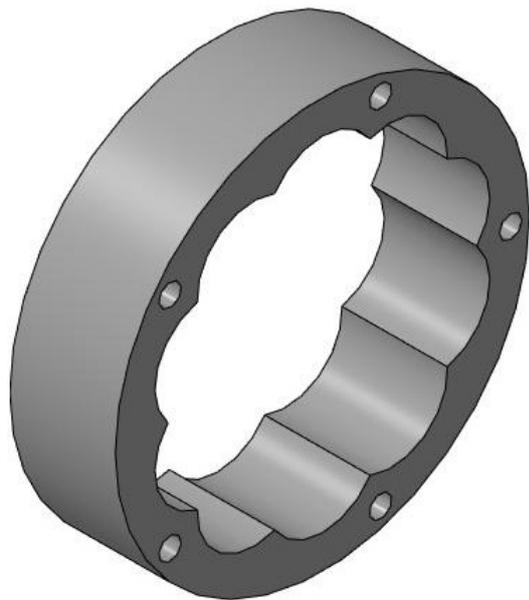


Рис. 2. Детали редуктора:
а – жесткое колесо; б – сепаратор

Материалы и методы. Методики расчета волновых редукторов с промежуточными телами качения приведены в специальной литературе, но

не стандартизованы в отличие от зубчатых эвольвентных и червячных передач, так же как и

нормы точности зацепления [7], что усложняет процесс проектирования.

Профиль жесткого колеса описывается следующими параметрическими уравнениями [8, 9]:

$$X_P = Y \sin \frac{\varphi}{Z} + 0,5d_{\text{ш}(P)} \sin \left(\alpha + \frac{\varphi}{Z} \right); \quad (1)$$

$$Y_P = Y \cos \frac{\varphi}{Z} + 0,5d_{\text{ш}(P)} \cos \left(\alpha + \frac{\varphi}{Z} \right), \quad (2)$$

где $Y = l_E \cos \varphi + \sqrt{R_{\Sigma}^2 - l_E^2 \sin^2 \varphi}$ – расстояние от центра тела качения до оси жесткого колеса, м; $R_{\Sigma}^2 = 0,5(D_B + d_{\text{ш}(P)})$ – расстояние от центра тела качения до оси волнообразователя, м; φ – угол поворота входного звена, град; l_E – эксцентриситет волнообразователя, размер которого рекомендуется принимать равным $0,75d_{\text{ш}(P)}$, м; α – угол передачи движения, град, где

$$\tan \alpha = \frac{Zl_E \sin \varphi}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 - l_E^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (3)$$

Силовой расчет по имеющимся зависимостям сводится к определению диаметра тел качения, в качестве которых могут выступать шарики или ролики [10]:

$$d_{\text{ш}(P)} \geq 78,4 \sqrt[3]{\frac{T_2 \cdot \sin(\pi/Z)}{n \cdot k_p \cdot Z}}, \quad (4)$$

где T_2 – момент выходного вала, Н·м; n – число рядов тел качения; k_p – коэффициент, характеризующий увеличение допустимого момента при использовании роликов. При длине роликов $l_p = d_p$ передаваемый момент в 1,6-2,6 раза больше, чем у шарика того же диаметра.

Формула (4) в качестве критерия работоспособности подразумевает расчет на срез перемычки между телами качения сепаратора. При этом поверхности качения предполагают использование высокопрочных легированных (шарикоподшипниковых сталей) с закалкой до высокой твердости 60HRC [11]. Применение указанных материалов позволяет обеспечить минимальные массогабаритные показатели передачи. Кроме того, наряду с вышеуказанным критерием в качестве нормируемого параметра расчета приводится жесткость передачи. Данный подход позволяет с запасом обеспечить работоспособность непосредственно зацепления. При этом расчетный срок службы составляет несколько десятков тысяч часов [2, 12].

Применение закаленных до высокой твердости материалов для жесткого колеса и сепаратора усложняет технологию обработки деталей. Это связано с тем, что для чистовой обработки контактирующих с телами качения

поверхностей сепаратора и жесткого колеса подразумевает выполнение шлифовальной операции или высокоскоростной фрезерной обработки с применением специализированного оборудования [11]. Шлифование данных поверхностей на широко распространенных кругло и плоскошлифовальных станках невозможно. Указанная особенность существенно влияет на возможности изготовления с применением распространенного станочного парка и себестоимость обработки.

В свою очередь черновая предварительная обработка деталей сепаратора и жесткого колеса из незакаленных материалов не вызывает существенных затруднений. Обработка деталей диаметром 200–400 мм может выполняться на токарных 3-х, 4-х осевых фрезерных станках и обрабатывающих центрах с ЧПУ из широко распространенной средней части размерного ряда, в отличие от зубообрабатывающих станков.

Учитывая отсутствие особых требований к кинематической точности редуктора допуски на элементы зацепления должны также назначаться с учетом планируемых к применению технологий обработки и ограничиваться 6-м качеством для внешних поверхностей и 7-м качеством для внутренних [13].

Стандартизованные методики расчета [14] широко распространенных зубчатых зацеплений, позволяют применять, в том числе стали с термической обработкой нормализация или улучшение, чистовое фрезерование которых дает возможность отказаться от дорогостоящих шлифовальных отделочных операций. Однако при проектировании деталей зацепления требуется учитывать применение указанных материалов, так как их механические характеристики существенно ниже [15]. Естественное ухудшение массогабаритных показателей для приводов стационарного оборудования не столь важно, как применение широкодоступных технологий обработки. Применяемая методика расчета должна учитывать контактные нагрузки в зацеплении, так как естественное увеличение размеров передачи увеличивает сечение перемычки сепаратора с одновременным уменьшением воздействующих нагрузок. Наряду с этим необходимо иметь в виду, что волновой редуктор является, прежде всего, альтернативой планетарным редукторам, часто применяемым в качестве второй ступени многоступенчатых редукторов. В свою очередь указанная особенность оказывает влияние на методику расчета, так как предполагает небольшие частоты вращения и соответственно число эквивалентных циклов нагружения, а также

отсутствие особых требований по угловой жесткости и свободному ходу. Кроме того, расчет зацепления должен позволять учитывать влияние не только диаметра, но и длины роликов на контактные напряжения в зацеплении. Определения наибольших контактных напряжений в зацеплении возможно по формулам расчета напряжений в роликовых подшипниках качения [16].

В волновой передаче с промежуточными телами качения передача вращающего момента от волнообразователя на выходной вал – сепаратор через тело качения подразумевает наличие 3-х контактирующих поверхностей [17] имеющих различные приведенные радиусы кривизны: волнообразователь – тело качения, тело качения – жесткое колесо и тело качения – сепаратор. При этом детали, контактирующие с телом качения, имеют разный тип поверхностей: волнообразователь – выпуклую поверхность, сепаратор – плоскую, жесткое колесо – вогнутую поверхность.

Контактные напряжения в паре волнообразователь – ролик:

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{F_1 \cdot E}{l_p} \left(\frac{2}{d_p} + \frac{1}{r_B} \right)}, \quad (5)$$

где F – нагрузка на ролик, Н; E – приведенный модуль упругости, Па; l_p – эффективная длина ролика, м; d_p – диаметр ролика, м; r_B – радиус кривизны волнообразователя, м.

Контактные напряжения в паре ролик – жесткое колесо:

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{F_p \cdot E}{l_p} \left(\frac{2}{d_p} - \frac{1}{r_{ж}} \right)}, \quad (6)$$

где $r_{ж}$ – радиус кривизны впадины жесткого колеса с определенным допущением $r_{ж} = d_p$, м.

Контактные напряжения в паре ролик – сепаратор:

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{2F_2 \cdot E}{l_p \cdot d_p}}. \quad (7)$$

Нагрузка в контактных парах волнообразователь – ролик и ролик – жесткое колесо также будет различна. Учитывая тот факт, что угол взаимодействия жесткого колеса и тел качения, перемещающихся в радиальных пазах сепаратора, является переменным и составляет от 0 до 30 градусов. Количество тел качения участвующих в передаче крутящего момента в зацеплении согласно литературным данным [17, 18] составляет от 30 до 50 %. Кроме того, данный параметр также зависит от точности изготовления элементов зацепления.

Сила взаимодействия между телом качения и волнообразователем может быть определена по

известному моменту входного вала и эксцентриситета:

$$F_1 = \frac{T_1}{(0,3...0,5) e_B \cdot Z \cdot n}. \quad (8)$$

Зная величину момента на выходном валу, есть возможность определить среднее значение силы взаимодействия между телом качения и сепаратором:

$$F_2 = \frac{T_2}{(0,3...0,5) R_{сеп} \cdot Z \cdot n}. \quad (9)$$

где $R_{сеп}$ – радиус сепаратора, м.

Среднее значение силы взаимодействия жесткого колеса и тела качения является результирующей радиальной и тангенциальной составляющих сил, действующих на тело качения:

$$F_p = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}. \quad (10)$$

Большее значение из составляющих результирующей силы, определяемое эксцентриситетом передачи возникает в парах волнообразователь – тело качения (1286 Н) и тело качения – жесткое колесо (1431 Н) и меньшее значение в паре тело качения – сепаратор (627 Н).

Приравнивая допускаемые к контактным напряжениям, появляется возможность определить предел контактной выносливости поверхности зубьев. В свою очередь данная величина зависит от твердости деталей и соответствует базовому числу циклов нагружений:

$$\sigma_{Hlim} = \frac{\sigma_H S_{Hlim}}{Z_N Z_L Z_R Z_V Z_\omega Z_X}, \quad (11)$$

где S_{Hlim} – минимальный коэффициент запаса прочности; Z_L – коэффициент, учитывающий влияние смазочного материала; Z_R – коэффициент, учитывающий влияние исходной шероховатости поверхности зубьев; Z_V – коэффициент, учитывающий влияние окружной скорости; Z_ω – коэффициент, учитывающий влияние перепада твердостей материалов сопряженных поверхностей зубьев; Z_X – коэффициент учитывающий размер зубчатого колеса; Z_N – коэффициент долговечности.

Требуемая твердость контактных поверхностей из условия обеспечения равного ресурса при средней твердости менее 350 НВ, соответствующей термообработке нормализации или улучшению:

$$H_{HB} = \frac{(\sigma_{Hlim} - 70)}{2}. \quad (12)$$

Требуемая твердость контактных поверхностей из условия обеспечения равного

ресурса при средней твердости 38...50 HRC₃, соответствующей термообработке объемная и поверхностная закалка:

$$H_{HRC3} = \frac{(\sigma_{Hlim} - 200)}{17}. \quad (13)$$

Основная часть. В качестве примера для редуктора с выходным моментом $M=1000$ Н·м и

передаточным числом $i=24$ контактные напряжения в точке взаимодействия тела качения с сопряженной деталью при допущении работы половины тел качения в одном ряду имеют следующие значения: волнообразователь – 1224 МПа, жесткое колесо – 883,8 МПа, сепаратор – 827,2 МПа. Указанные величины представлены в виде диаграммы на рисунке 3.

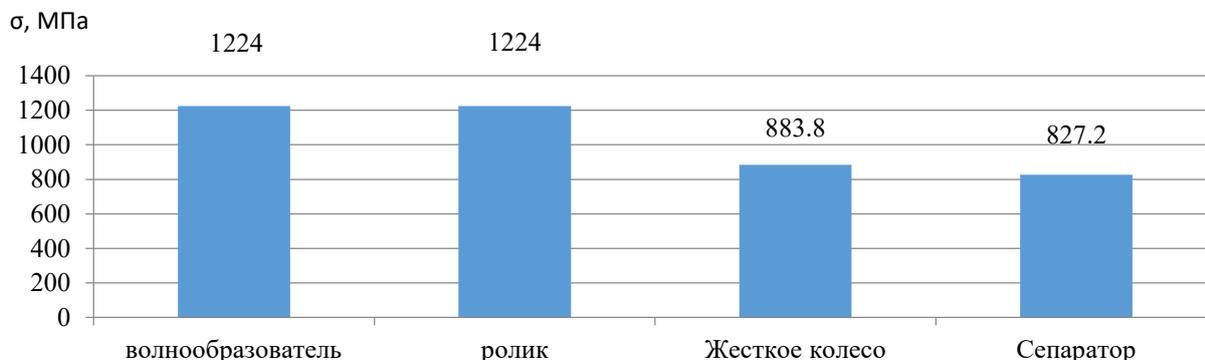


Рис. 3. Диаграмма контактных напряжений в зацеплении

Кроме того, необходимо иметь в виду, что тело качения взаимодействует в одном цикле с тремя деталями. Данный факт должен учитываться при определении коэффициента долговечности.

Отмеченные особенности позволяют при использовании принципа равного ресурса элементов передачи с помощью выше представленных выражений (12) и (13) определить требуемую твердость рабочих

поверхностей. Так для деталей редуктора взятого в качестве примера твердость составила: ролик – 60 HRC, волнообразователь – 48 HRC, жесткое колесо – 329,5 HB, сепаратор – 306 HB. Полученные значения, представлены в виде диаграммы на рисунке 4, соответствуют различным видам термической обработки и соответственно чистовых операций технологического процесса.

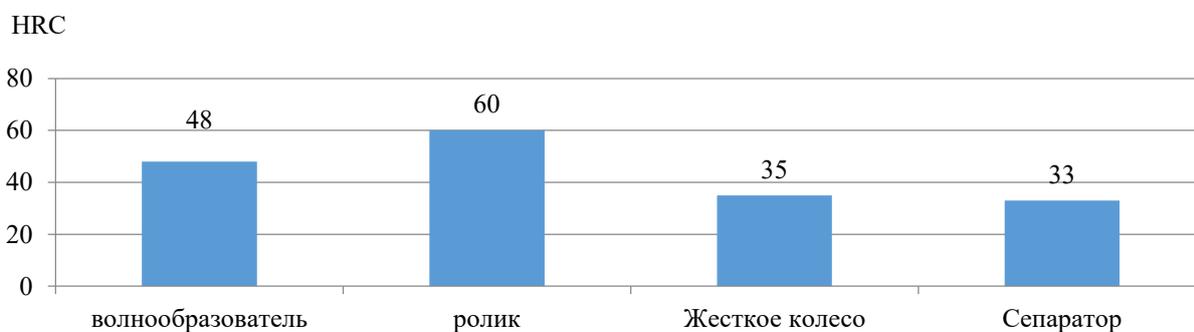


Рис. 4. Диаграмма требуемой твердости рабочих поверхностей деталей редуктора

После расчета зацепления необходимо выполнить расчет срока службы подшипников входного вала, волнообразователей и выходного вала с учетом действующей нагрузки и грузоподъемности выбранных подшипников.

Наиболее нагруженными являются подшипники волнообразователей:

$$L = a_1 a_{23} \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^p, \quad (14)$$

где C_r – динамическая грузоподъемность, постоянная нагрузка, соответствующая сроку службы 10^6 при вероятности безотказной работы 90%; P_r – постоянная нагрузка, Н [16].

Результаты проделанных расчетов сведены в таблицу 1.

Из выше изложенного можно сделать вывод, что расчет контактных нагрузок позволяет получить допустимые напряжения, удовлетворяющие требованиям заданного ресурса и применяемой технологии обработки. Увеличение длины роликов позволяет добиться ограничения контактных напряжений и соответственно желаемой твердости материала, однако при этом необходимо проводить расчет перемены сепаратора не только на срез, но и на изгиб, рассматривая переменку как жестко защемленную двухопорную балку.

Таблица 1

**Зависимость размеров тел качения и грузоподъемности подшипников
волнового редуктора ($i=36, M=4200 \text{ Н}\cdot\text{м}$) от расчетного срока службы**

Характеристики		Срок службы, часов		
		500	4000	7000
Вариант 1	Тело качения dxL	10x16	10x25	10x30
	Диаметр жесткого колеса	239	241	239
	Динамическая грузоподъемность подшипника волнообразователя	61800 Н	125000 Н	154000 Н
Вариант 2	Тело качения dxL	8x16	8x38	8x50
	Диаметр жесткого колеса	212,8	202,8	202,8
	Динамическая грузоподъемность подшипника волнообразователя	80000 Н	160000 Н	216000 Н

Максимальные изгибающие напряжения в ближнем к выходному валу ряду пазов сепаратора определяются зависимостью:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{T_2 L_{\text{PC}}}{R_{\text{сеп}} Z_p W_X}, \quad (15)$$

где L_{PC} – длина паза сепаратора, м; W_X – момент сопротивления минимального сечения перемычки пазов сепаратора, м³, определяемый по формуле:

$$W_X = \frac{R_{\text{сеп}}^2 \delta \left(\frac{\pi \beta}{180} + \sin \alpha - 8 \sin^2 \frac{\beta}{2} \frac{180}{\pi \alpha} \right)}{R_{\text{сеп}} - 2 R_{\text{сеп}} \sin \frac{\beta}{2} \frac{180}{\pi \beta}}, \quad (16)$$

где δ – толщина стенки сепаратора, м; $\beta = 360^\circ / Z$ – угол между стенками перемычки, град.

Вместе с тем увеличение длины роликов, увеличивает изгибающие напряжения в перемычках сепаратора при уменьшении контактных напряжений. Кроме того, необходимо учитывать форму паза сепаратора, поскольку обработка концевой фрезой прямоугольного контура требует засверливания углов, либо наличия радиусных переходов в углах. В первом случае возможно применение тел качения цилиндрической формы без фасок, однако отверстия в углах уменьшают сечение перемычки. Во втором случае необходимы фаски на телах качения. При этом соответственно уменьшается рабочая длина ролика относительно длины паза.

Выбор формы паза сепаратора под тело качения также оказывает существенное влияние на технологию обработки, поскольку определяет максимальный диаметр фрезы, которой возможна обработка. Следует отметить что, диаметр фрезы всегда получается меньше диаметра тела качения для обеспечения прямолинейного участка на торцевой

поверхности паза. Оптимизация формы сепаратора для получения возможности обработки пазов под ролики максимальным диаметром фрезы является важнейшей задачей при разработке его конструкции.

После построения трехмерных моделей необходимо провести анализ напряженного состояния методом конечных элементов. На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета прочности сепаратора соответственно с пазом в форме «косточка» и прямоугольника со скругленными узлами.

Таким образом, при конструировании редуктора следует выбирать максимальный диаметр тел качения (роликов) исходя из габаритных размеров передачи. Далее требуемые значения ресурса и твердости рабочих поверхностей следует обеспечивать увеличением длины тел качения при совместном учете контактных напряжений всех деталей зацепления и изгибающих напряжений в перемычке сепаратора.

Решение задачи применения универсального широко распространенного оборудования с ЧПУ для изготовления волновых редукторов позволяет снизить их себестоимость по сравнению с планетарными редукторами за счет сокращения числа деталей и применения единой (групповой) технологии.

По представленной методике в данном исследовании в АО «ЦеСИС» г. Пенза спроектированы и изготовлены опытные образцы волновых редукторов с передаточными отношениями 9, 24, 30, 36 и крутящим моментом до 4200 Н·м.

Основные детали приведены на рисунке 7. По результатам предварительных испытаний

редуктора подтвердили заявленные технические характеристики.

Вместе с тем кроме решения задачи по силовому расчету деталей редуктора с учетом возможности применения различных материалов требуется уточнение коэффициента полезного действия проектируемого редуктора. Испытания опытного образца редуктора с передаточным отношением $i=24$ и крутящим моментом $M=1000$ Н·м показали значение КПД равное 94,8%.

В настоящее время разработанный червячно-волновой привод, представленный на рисунке 8а, проходит ресурсные испытания в составе противотаранного устройства, общий вид которого показан на рисунке 8б. Разработанное изделие установлено вместо ранее применявшегося червячно-планетарного привода зарубежного производства.

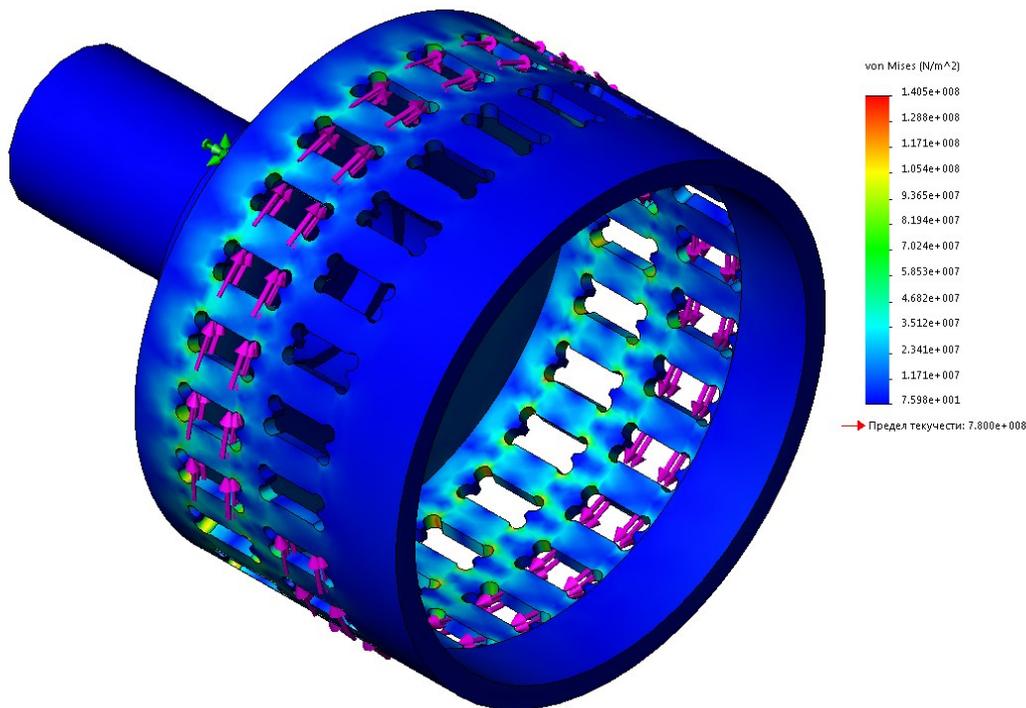


Рис. 5. Напряженное состояние сепаратора с пазом в форме «косточка»

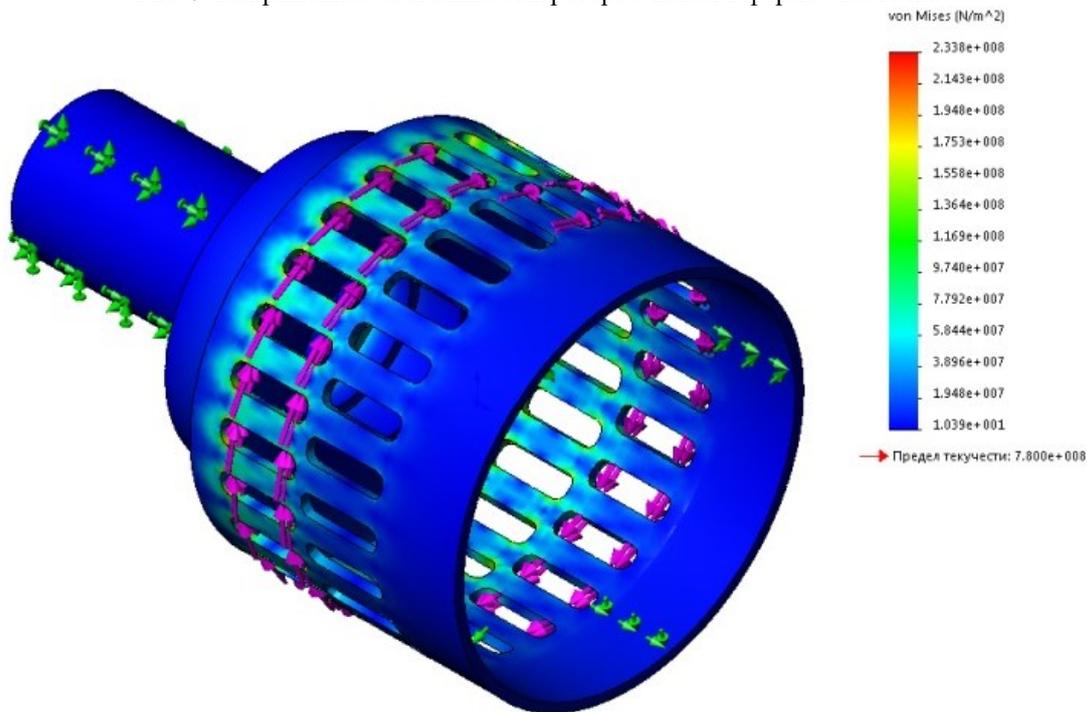


Рис. 6. Напряженное состояние сепаратора с пазом в форме прямоугольника со скругленными узлами

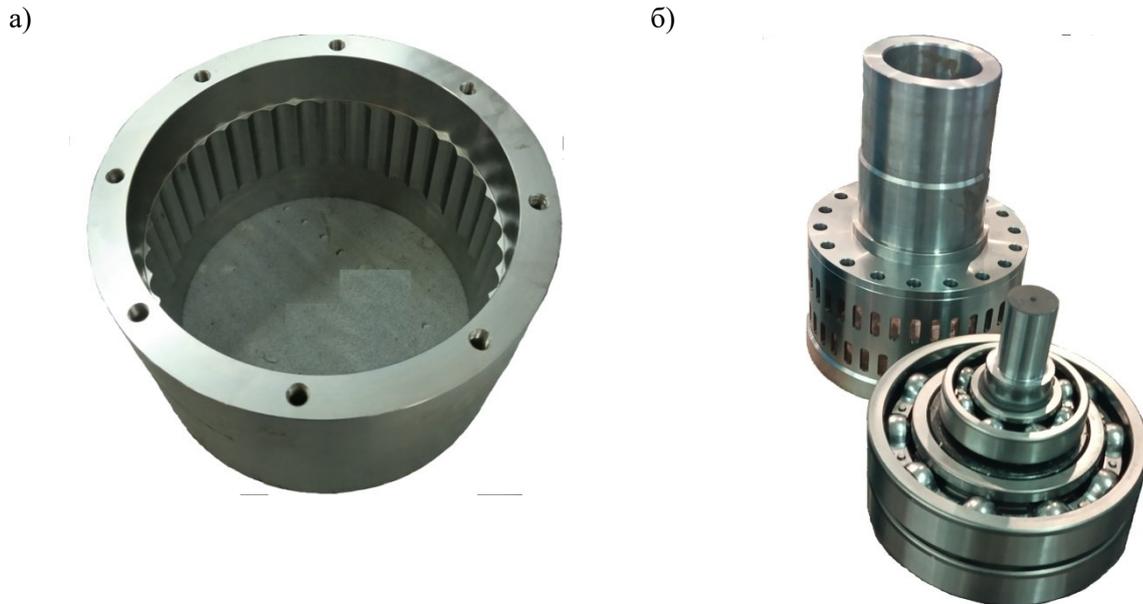


Рис. 7. Общий вид основных элементов редуктора:
а – жесткое колесо; б – волнообразователь и сепаратор

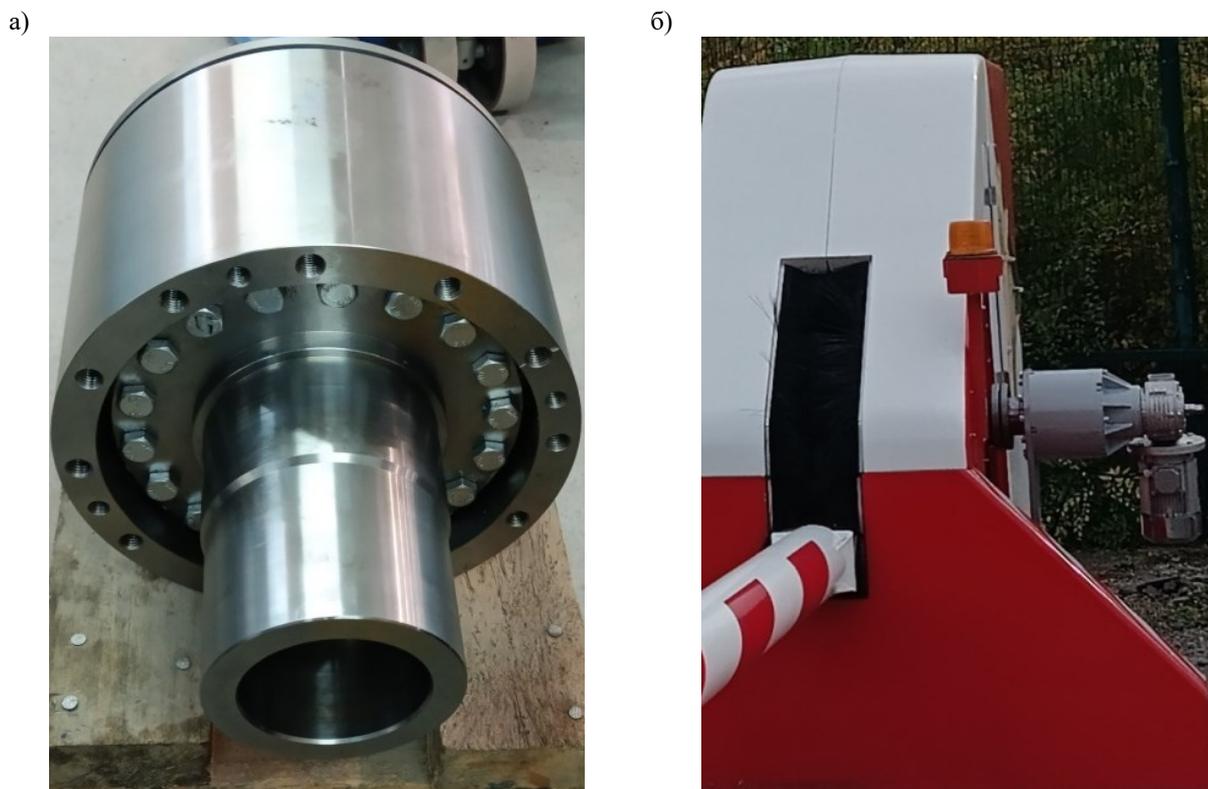


Рис. 8. Общий вид:
а – червячно-волновой привод; б – противотаранное устройство

В процессе испытаний отмечено значительное увеличение точности позиционирования поворачиваемой в вертикальной плоскости стрелы барьера благодаря близким к нулю свободным ходам редуктора. Без применения специальных измерительных устройств люфты в приводе не фиксируются. Опытная эксплуатация в течение более года отказов привода не выявила. На данный момент продолжают испытания

опытного образца и отработка методик проектирования и групповых технологических процессов изготовления деталей для максимального сокращения времени на конструкторско-технологическую подготовку производства волновых редукторов.

Выводы:

1. Предложено определять размеры элементов зацепления волнового редуктора по критерию кон-

тактной прочности для пар: волнообразователь – ролик, ролик – жесткое колесо, ролик – сепаратор с учетом кривизны поверхностей деталей.

2. Использовать для определения допустимых контактных напряжений в зацеплении методики расчета зубчатых цилиндрических эвольвентных передач, что позволяет учитывать число эквивалентных циклов нагружения, твердость и шероховатость рабочих поверхностей и другие параметры.

3. Ограничить из условий технологичности лезвийной обработки твердость деталей со сложным профилем (жесткого колеса и сепаратора) и применять для их изготовления стали с термической обработкой нормализация или улучшение.

4. При назначении твердостей поверхностей контактных пар зацепления (волнообразователь – ролик, ролик – жесткое колесо, ролик – сепаратор) необходимо исходить условием равного ресурса.

5. Обеспечивать требуемый ресурс передачи рациональным выбором диаметра и длины тел качения.

6. При увеличении длины тел качения показана необходимость проверки прочности на изгиб перемычки сепаратора.

7. Определена возможность использования для обработки контактирующих в зацеплении поверхностей жесткого колеса и сепаратора чистового фрезерования вместо дорогостоящих шлифовальных отделочных операций.

8. Проведена экспериментальная проверка предлагаемой методики расчета и технических решений при проектировании, изготовлении и испытании волновых редукторов в приводах поворота устройств ограничения доступа и безопасности.

Предлагаемая методика расчета зацепления волновых редукторов с промежуточными телами качения может найти применение при проведении инженерных расчетов силовых приводов, к которым не предъявляются жесткие требования по кинематической точности, жесткости и ограничения массогабаритных показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артемов И.И., Чуфистов Е.А., Липов А.В., Большаков Г.С., Носков К.А. Обеспечение качества планетарно-цевочных передач при проектировании и производстве // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3(47). С. 124–139. DOI: 10.21685/2072-3059-2018-3-12.

2. Николаев П.И., Дубровин А.Н., Громышев Е.В. Преимущества применения планетарно-цевочных (циклоидальных) и волновых редукторов с промежуточными телами качения в

электроприводах "РэмТЭК" // Газовая промышленность. 2023. № 10(855). С. 78–81.

3. Аксенов В.В., Тимофеев В.Ю., Блащук М.Ю. Разработка схемного решения привода геохода с волновой передачей с промежуточными телами качения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S3. С. 167–175.

4. Аксенов В.В., Тимофеев В.Ю., Блащук М.Ю., Ефременков А.Б. Обзор волновых передач возможных к применению в трансмиссии геохода // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № S3. С. 137–148.

5. Аксенов В.В., Тимофеев В.Ю. Синтез вариантов схемных решений трансмиссии геохода с волновой передачей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S6. С. 426–439.

6. Соболев А.Н., Некрасов А.Я., Бровкина Ю.И. Моделирование механических передач с промежуточными телами качения // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 3(46). С. 40–44.

7. Ан И.К., Панкратов Э.Н., Лазуркевич А.В. Кинематический анализ промежуточного тела планетарной передачи с зацеплением промежуточных тел // Вестник машиностроения. 2022. № 3. С. 41–47. DOI 10.36652/0042-4633-2022-3-41-47.

8. Кочетков П.А. Расчет волновых редукторов с промежуточными телами качения // Modern Science. 2020. № 6-2. С. 270–274.

9. Янгулов В.С. Геометрические и конструктивные соотношения в волновых передачах с промежуточными телами качения // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 2. С. 24–27.

10. Чернавский С.А., Снесарев Г.А., Козинцов Б.С., Боков К.Н., Чернилевский Д.В., Корж Д.Д., Мороз С.Ф., Самсонович С.Л. под общ. ред. Козинцова Б.С., Козинцовой М.Б. Проектирование механических передач: учебное пособие. Москва: ИНФРА-М, 2022. 536 с.

11. Янгулов В.С., Дмитриев В.С., Москалюк И.А. Концепция оборудования для нарезания зубчатого венца жесткого колеса волновой передачи с промежуточными телами качения // Фундаментальные исследования. 2010. № 12. С. 165–171.

12. Гусеница Я.Н., Петров К.А. Проектирование мотор-редуктора на базе волновой передачи с промежуточными телами качения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 87–91.

13. Янгулов В.С., Беляев А.Е. Расчёт мёртвого хода волновых передач с

промежуточными телами качения // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313, № 3. С. 75–77.

14. ГОСТ 21354–87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.

15. Липов А.В., Большаков Г.С., Носков К.А. Определение рациональных параметров, материалов и технологий изготовления элементов планетарно-цевочных зацеплений редукторов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. Т. 8, № 2(46). С. 131–135.

16. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.

Информация об авторах

Большаков Герман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения. E-mail: geraman83@mail.ru. Пензенский государственный университет. Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40.

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизация и управление. E-mail: tda82@list.ru. Пензенский государственный технологический университет. Россия, 440039, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д.1а/11.

Поступила 08.11.2024 г.

© Большаков Г.С., Тарасов Д.А., 2025

¹*Bolshakov G.S.*, ²**Tarasov D.A.*

¹*Penza State University*

²*Penza State Technological University*

**E-mail: tda82@list.ru*

INCREASING TECHNOLOGY IN THE DESIGN OF WAVE REDUCERS FOR POWER DRIVES REFERENCES

Abstract. Gearboxes with a relatively high gear ratio of 200...300 and a torque of up to 6000 N·m are widely used in rotation drives of access restriction and safety devices. The supply of serial worm and planetary gearboxes with an output torque of 1000 N·m for industrial use is very limited. This has become especially evident after the reduction in the range of foreign-made gearboxes. Designing and manufacturing special gearboxes is associated with significant difficulties due to the large number of parts in planetary gearboxes and the need for specialized gear-cutting equipment. An alternative to planetary gearboxes are planetary-pinion and wave gearboxes with intermediate rolling elements. Wave gearboxes are a type of well-known planetary drives, the advantage of which, compared with planetary drives, is a higher gear ratio in one stage. The possibility of using normalized and improved steels for parts with a complex profile (rigid wheel and separator) with a limitation of their hardness is analyzed. This possibility allows using finish milling of these parts instead of expensive grinding finishing operations to improve the manufacturability of production. A method for determining the dimensions of the engagement elements of a wave reducer by the criterion of contact strength for pairs is proposed: wave former – roller, roller – rigid wheel, roller – separator. The possibility of determining the permissible contact stresses in the engagement by the methods of calculating cylindrical involute gears is considered, which allows taking into account the number of equivalent loading cycles, hardness and roughness of the working surfaces, as well as other parameters.

Keywords: wave reducer, intermediate rolling elements, contact stresses, hardness.

REFERENCES

1. Artemov I.I., Chufistov E.A., Lipov A.V., Bolshakov G.S., Noskov K.A. Ensuring the quality

of planetary-pinion gears during design and production. [Obespechenie kachestva planetarno-

cevochnyh peredach pri proektirovani i proizvodstve]. University Proceedings Volga Region Engineering Sciences. 2018. No. 3 (47). Pp. 124–139. DOI 10.21685 / 2072-3059-2018-3-12. (rus)

2. Nikolaev P.I., Dubrovin A.N., Gromyshev E.V. Advantages of using planetary-pinion (cycloidal) and wave gearboxes with intermediate rolling elements in RemTEK electric drives. [Preimushchestva primeneniya planetarno-cevochnyh (cikloidal'nyh) i volnovyh reduktorov s promezhutochnymi telami kacheniya v elektroprivodah "RemTEK"]. Gazovaya promyshlennost'. 2023. No. 10 (855). Pp. 78–81. (rus)

3. Aksenov V.V., Timofeev V.Yu., Blashchuk M.Yu. Development of a schematic solution for a geokhod drive with a wave transmission with intermediate rolling elements. [Razrabotka skhemnogo resheniya privoda geohoda s volnovoj peredachej s promezhutochnymi telami kacheniya]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2012. No. S3. Pp. 167–175. (rus)

4. Aksenov V.V., Timofeev V.Yu., Blashchuk M.Yu., Efremkov A.B. Review of wave transmissions possible for use in a geokhod transmission [Obzor volnovyh peredach vozmozhnyh k primeneniyu v transmissii geohoda]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2010. No. S3. Pp. 137–148. (rus)

5. Aksenov V.V., Timofeev V.Yu. Synthesis of variants of circuit solutions for the transmission of a geokhod with a wave transmission. [Sintez variantov skhemnyh reshenij transmissii geohoda s volnovoj peredachej]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2013. No. S6. Pp. 426–439. (rus)

6. Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya., Brovkina Yu.I. Modeling of mechanical transmissions with intermediate rolling elements. [Modelirovanie mekhanicheskikh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya]. Vestnik MSUT "Stankin. 2018. No. 3 (46). Pp. 40–44. (rus)

7. An I.K., Pankratov E.N., Lazurkevich A.V. Kinematic analysis of the intermediate body of a planetary transmission with engagement of intermediate bodies. [Kinematicheskij analiz promezhutochnogo tela planetarnoj peredachi s zacepleniem promezhutochnyh tel]. Vestnik mashinostroeniya. 2022. No. 3. Pp. 41–47. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-41-47. (rus)

8. Kochetkov P.A. Calculation of wave gearboxes with intermediate rolling elements. [Raschet volnovyh reduktorov s promezhutochnymi telami kacheniya]. Modern Science. 2020. No. 6-2. Pp. 270–274. (rus)

9. Yangulov V.S. Geometric and design relationships in wave transmissions with intermediate rolling elements. [Geometricheskie i konstruktivnye

sootnosheniya v volnovyh peredachah s promezhutochnymi telami kacheniya]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2008. Vol. 312. No. 2. Pp. 24–27. (rus)

10. Chernavskiy S.A., Snesev G.A., Kozintsov B.S., Bokov K.N., Chernilevsky D.V., Korzh D.D., Moroz S.F., Samsonovich S.L. under the general editorship of Kozintsov B.S., Kozintsova M.B. Design of mechanical transmissions: a tutorial. [Proektirovanie mekhanicheskikh peredach: uchebnoe posobie]. Moscow: INFRA-M. 2022. 536 p. (rus)

11. Yangulov V.S., Dmitriev V.S., Moskalyuk I.A. Concept of equipment for cutting the gear rim of a rigid wheel of a wave transmission with intermediate rolling elements. [Konceptiya oborudovaniya dlya narezaniya zubchatogo venca zhyostkogo koleasa volnovoj peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya]. The Fundamental Researches. 2010. No. 12. Pp. 165–171. (rus)

12. Gusenera Ya.N., Petrov K.A. Design of a geared motor based on a wave transmission with intermediate rolling elements. [Proektirovanie motor-reduktora na baze volnovoj peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. No. 4. Pp. 87–91. (rus)

13. Yangulov V.S., Belyaev A.E. Calculation of the backlash of wave transmissions with intermediate rolling elements. [Raschyot myortvogo hoda volnovyh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2008. Vol. 313. No. 3. Pp. 75–77. (rus)

14. GOST 21354 – 87. Cylindrical involute gear transmissions with external engagement. Strength calculation. [Cylindrical evolvent gears of external engagement. Strength calculation]. (rus)

15. Lipov A.V., Bolshakov G.S., Noskov K.A. Determination of rational parameters, materials and manufacturing technologies for elements of planetary-pinion gearing of gearboxes. [Opredelenie racional'nyh parametrov, materialov i tekhnologij izgotovleniya elementov planetarno-cevochnyh zacepleniya reduktorov]. XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2019. Vol. 8. No. 2(46). Pp. 131–135. (rus)

16. Reshetov D.N. Machine parts: Textbook for students of mechanical engineering and mechanical specialties of universities. [Detali mashin: Uchebnik dlya studentov mashinostroytel'nyh i mekhanicheskikh special'nostej vuzov]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 496 p. (rus)

17. Aksenov V.V., Timofeev V.Yu. Justification of the conceptual version of the layout of a wave transmission with a hollow shaft for the transmission of a geokhod. [Obosnovanie konceptual'nogo varianta komponovki volnovoj peredachi s polym valom dlya transmissii geohoda] Mining information and

analytical bulletin (scientific and technical journal). 2012. No. S7. Pp. 282–286. (rus)

18. Abdulin R.R., Podshibnev V.A., Samsonovich S.L. Determination of the coefficient of unevenness between rows of rolling elements in a wave transmission with intermediate rolling elements.

[Opredelenie koeficienta neravnomernosti mezhdu ryadami tel kachenij v volnovej peredache s promezhutochnymi telami kacheniya]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2021. No. 5 (349). Pp. 58–67. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-58-67. (rus)

Information about the authors

Bolshakov, German S. PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering. E-mail: geraman83@mail.ru. Penza State University. Russia, 440026, Penza, Krasnaya St., 40.

Tarasov, Denis A. PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automation and Control. E-mail: tda82@list.ru. Penza State Technological University. Russia, 440039, Penza, Baidukova Drive/Gagarin St., 1a/11.

Received 08.11.2024

Для цитирования:

Большаков Г.С., Тарасов Д.А. Повышение технологичности при проектировании волновых редукторов силовых приводов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 133–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-133-144

For citation:

Bolshakov G.S., Tarasov D.A. Increasing technology in the design of wave reducers for power drives references. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 133–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-133-144