

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2023

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**

№ 11, 2023 год

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

Vol. 11. 2023

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 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. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	16.11.2023
Выход в свет	27.11.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,89. Уч.-изд. л. 13,86. Тираж 40 экз. Заказ № 154

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2023

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 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. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	16.11.2023

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).

Ахмедова Елена Александровна, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).

Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Полужтова 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Petr G. 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, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Сулейманов К.А., Погорелова И.А. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	8
Мокрова М.В., Сардарова С.А. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПСОВОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ	18
Маркина Ю.Д. КРУЧЕНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ	27
Юрьев А.Г., Зинькова В.А. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ КОСОГО ИЗГИБА	37
Мавлюбердинов А.Р., Богданов Р.Р., Сулейманова Л.А. К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ	46
Кущев Л.А., Уваров В.А., Крюков И.В., Брежнев Д.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА СО СПИРАЛЬНЫМ ЗМЕЕВИКОВОМ	54
Соколова Н.В., Ухабин В.В. ВЫСОТНЫЙ РЕГЛАМЕНТ ДЛЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРОДА ПЕНЗЫ	64
Павлов А.А., Бергман А.В. КОМПОЗИЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФОРМОТВОРЧЕСКАЯ БАЗА АРХИТЕКТУРЫ ЛЕНИНГРАДСКОГО КОНСТРУКТИВИЗМА	73

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛИЗУЮЩЕГО ЭФФЕКТА КРИОЛИТА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕССЫ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ	82
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ	93
Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н.А., Кравченко В.М., Чуева Ю.А. ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН	103

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Suleymanov K.A., Pogorelova I.A. ENERGY POTENTIAL OF AERED CONCRETE MIXTURES	8
Mokrova M.V., Sardarova S.A. INCREASING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GYPSUM COMPOSITE FOR DECORATIVE PRODUCTS	18
Markina Yu.D. TORSION OF LOWER BELT OF CRANE SECONDARY TRUSS	27
Yuriev A.G., Zinkova V.A. NON LINEAR PROBLEMS OF OBLIQUE BENDING	37
Mavlyuberdinov A.R., Bogdanov R.R., Suleymanova L.A. ON THE ISSUE OF SOLVING THE PROBLEM OF OPERATION OF PANEL BUILDINGS	46
Kushchev L.A., Uvarov V.A., Kryukov I.V., Brezhnev D.A. EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TECHNICAL PARAMETERS OF A SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER WITH A SPIRAL COIL	54
Sokolova N.V., Uhabin V.V. HEIGHT REGULATIONS FOR THE HISTORICAL CENTER OF PENZA	64
Pavlov A.A., Bergman A.V. COMPOSITIONAL FEATURES AND FORM-CREATIVE BASIS OF LENINGRAD CONSTRUCTIVISM ARCHITECTURE	73

CHEMICAL TECHNOLOGY

Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Levina Yu.A. STUDY OF THE MINERALIZING EFFECT OF CRYOLITE AND ITS INFLUENCE ON THE PROCESSES OF CLINKER FORMATION	82
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF DESIGN ELEMENTS OF A ROBOTIC CELL	93
Duganov V.Ya., Duyun T.A., Chuev K.V., Arhipova N.A., Kravchenko V.M., Chueva Yu.A. PROBLEMS OF RECYCLING LARGE-SIZED CAR TIRES	103

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-8-17

Сулейманов К.А., Погорелова И.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: karimsuleymanov@mail.ru*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. Энергетический потенциал газобетонных смесей – это характеристика, отражающая способность материалов выделять тепловую энергию в процессе их обработки или реакции. Этот потенциал зависит от состава смеси и других факторов, таких как теплоемкость компонентов и процесса гидратации. В контексте газобетонных материалов, которые широко используются в строительстве, энергетический потенциал играет важную роль при их производстве и применении, влияя на тепловые характеристики материала и способность сохранять или выделять тепло в зависимости от окружающих условий и процессов. В данной работе авторами проведено исследование влияния состава смеси на ее энергетическую эффективность. В рамках исследования представлен анализ производственных технологий и рецептур, используемых на различных предприятиях. Особое внимание уделено оценке номинальных составов газобетонных смесей для материалов разной плотности с учетом основных компонентов газобетонных смесей, влияющих на энергетический потенциал. Осуществляется также анализ теплоемкости газобетонных смесей с учетом массового содержания компонентов. Исследование энергетического потенциала газобетонных смесей позволяет более эффективно управлять производственными процессами, оптимизировать энергопотребление и использовать материал в различных условиях с учетом его тепловых свойств.

Ключевые слова: газобетонная смесь, вяжущее, теплофизические характеристики, объемная теплоемкость, энергетический потенциал.

Введение. Газобетон, как строительный материал, обрел широкое применение в современной индустрии строительства благодаря своим уникальным свойствам, таким как низкая плотность, высокая теплоизоляционная способность и прочность [1–4]. Однако, эффективное использование газобетонных материалов в производстве и строительстве тесно связано с пониманием и оптимизацией их энергетического потенциала.

Энергетический потенциал газобетонных смесей определяется множеством факторов, включая состав смесей, теплоемкость компонентов и характеристики производственных процессов [5–8]. Энергетический потенциал имеет решающее значение для разработки эффективных технологий производства и оптимизации энергозатрат [9–12].

Энергетический потенциал газобетонной смеси определяется преимущественно составом смеси [13–16]. На каждом отдельно взятом современном заводе автоклавного газобетона в процессе производства изделий изменяются характеристики сырья, корректируется состав смеси и варьируются технологические параметры. Эффективно меняющиеся параметры требуют оперативного управления технологическим процессом.

Материалы и методы. Анализ технологии производства и используемых рецептур на ряде предприятий таких, как завод ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия), ЗАО «Могилевский КСИ»

(г. Могилев, Республика Беларусь), «Сертоловский Газобетонный Завод (СГЗ)», ООО «ЛСР. Стеновые» (г. Сертолов, Ленинградская обл., Россия) и других предопределил назначение номинальных составов, анализ которых позволил определить количество твердой фазы (без учета алюминиевой пасты и гипса) и газовой фазы во вспученном массиве (рис. 1).

Твердая и газовая фазы номинальных составов газобетона отражают реальное количество компонентов в смеси для производимых газобетонных изделий с марками по средней плотности $D400$, $D500$ и $D600$, а также тенденцию продвижения по составам при изготовлении газобетона с маркой по средней плотности до $D100$. Основные компоненты в газобетонной смеси представлены известью, цементом, песком и водой. Гипс и алюминиевый газообразователь из-за малого количества не учитывали. Для строительной извести активность установлена равной 85 %. Содержание активного алюминия в пасте газообразователя принято 75 %.

Реальный вид и состав материалов, используемых при приготовлении газобетонных смесей в производственных условиях, зависит от принятой заводом технологии. Так на заводе ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия) в смеситель дозируют песчаный шлам, получаемый мокрым помолом песка с водой. Далее дозируют обратный шлам, получаемый распулпацией обрезков газо-

бетонного массива после камер предварительного твердения. На смешение в сухом виде подают цемент, известково-кремнеземистое вяжущее и полуводный гипс. Количество известково-кремнеземистого вяжущего определяет активность смеси по оксиду кальция. Температуру смеси регулируют соотношением подаваемой на замес горячей и холодной воды. За минуту до завершения перемешивания в смеситель дозируют алюминиевую суспензию. Вода является наиболее энергоемким компонентом в газобетонной смеси. На ее долю приходится от 69,2 до 81,6 % энергии, необходимой для нагрева смеси, что

указывает на преимущество ударной технологии в энергетическом плане. В ООО «ЛСР. Стеновые» (г. Сертолов, Ленинградская обл., Россия) используют порошкообразную известь. Двухводный гипс вводится при приготовлении песчаного шлама. Однако по номинальному составу смеси в ООО «ЛСР. Стеновые» соответствовали составу смеси в ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия). Показатели состава номинальных газобетонных смесей приведены в таблице 1.

Теплофизические характеристики компонентов газобетонной смеси приведены в таблице 2.

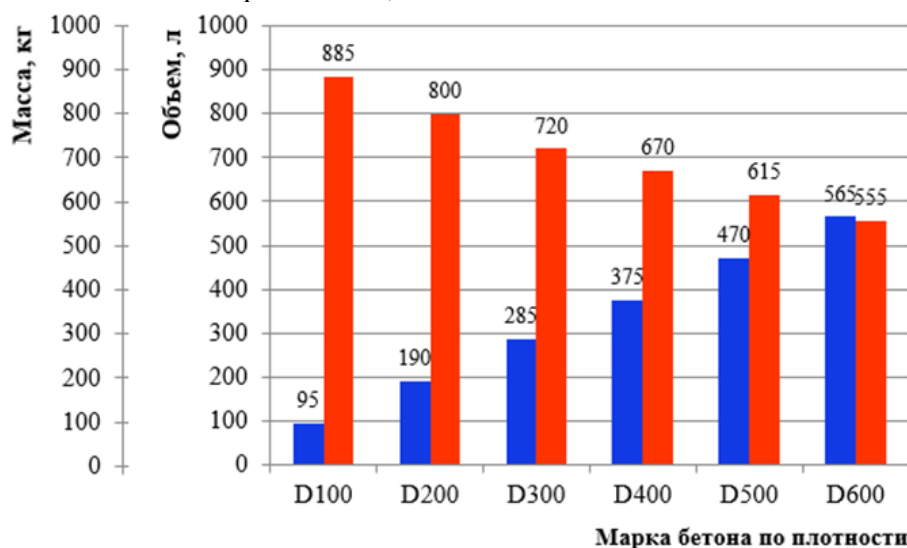


Рис. 1. Твердая и газовая фазы газобетона: ■ – твердая фаза; ■ – газовая фаза

Таблица 1

Показатели состава номинальных газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Активность	%	13,42	11,18	10,44	10,20	9,04	8,27
Содержание СаО	кг/м ³	10,84	18,06	25,29	32,51	36,13	39,74
Содержание активного алюминия	кг/м ³	0,76	0,68	0,62	0,58	0,53	0,48
Водотвердое отношение, В/Т	–	0,84	0,68	0,60	0,51	0,45	0,41

Таблица 2

Удельная теплоемкость и плотность компонентов газобетонной смеси

Компонент	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость при 25°C, С° _p 298 Дж/(кг·град)
СаСО ₃	2710	818,7
Са(ОН) ₂	2230	1181,5
СаО	3320	763,7
SiO ₂	2650	740,0
СаSO ₄ ·0,5H ₂ O	2720	823,2
СаSO ₄ ·2H ₂ O	2320	1081,1
Цемент	3150	838,0
Al	2700	903,3
H ₂ Oж	997	4181,5
H ₂ Oг**	0,023	1864,5
Воздух*	1,292	1005,0
H ₂ г*	0,09	14282,7
Fe	7850	447,5

Примечание: * – при 0 °C; ** – при 100 °C

Основная часть. Теплоемкость газобетонных смесей определяли по правилу аддитивности, исходя из массового содержания компонентов в смеси, по формуле (1):

$$c = \frac{c_u m_u + c_{ц} m_{ц} + c_n m_n + c_в m_в}{m_u + m_{ц} + m_n + m_в}, \quad (1)$$

где $c_u, c_{ц}, c_n, c_в$ – удельные теплоемкости соответственно извести, цемента, кварцевого песка и

воды, Дж/(кг·°C); $m_u, m_{ц}, m_n, m_в$ – массовое содержание извести, цемента, кварцевого песка и воды в 1 м³ газобетонной смеси, кг.

Объемная доля газа в смеси от 50 до 90 %, при этом массовое количество незначительно и не влияет на теплоемкость газобетонной смеси.

Объемная теплоемкость газобетонных смесей и теплоемкость составляющих смесь компонентов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Объемная теплоемкость газобетонных смесей

Наименование	Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·°C) для марки по средней плотности					
	D100	D200	D300	D400	D500	D600
Газобетонная смесь	409,7	693,3	930,7	1083,2	1236,8	1390,5
Вода смеси	<u>334,5</u> *81,6	<u>543,6</u> *78,4	<u>710,9</u> *76,4	<u>794,5</u> *73,3	<u>878,1</u> *71,0	<u>961,8</u> *69,2
Твердая фаза смеси	<u>75,2</u> 18,4	<u>149,7</u> 21,6	<u>219,8</u> 23,6	<u>288,7</u> 26,7	<u>358,7</u> 29,0	<u>428,7</u> 30,8
Известь	11,6	19,3	27,0	34,7	38,6	42,5
Цемент	37,7	71,2	75,4	83,8	79,6	75,4
Песок	25,9	59,2	118,4	170,2	240,5	310,8

Примечание: * – % в газобетонной смеси

Значения удельных теплоемкостей, а также величины других характеристик газобетонных

смесей с марками по средней плотности от D100 до D600 приведены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Средняя плотность	кг/м ³	175	320	455	565	680	795
Газовая пористость	%	88,5	80,0	72,0	67,0	61,5	55,5
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°C)	2341	2167	2046	1917	1819	1749
Теплопроводность	Вт/(м·°C)	0,25	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42

Значения удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей связаны соотношением:

$$C = c \cdot \rho, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость газобетонной смеси, кДж/(кг·°C), ρ – средняя плотность газобетонной смеси, кг/м³. Величины удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей приведены в таблице 5.

Таблица 5

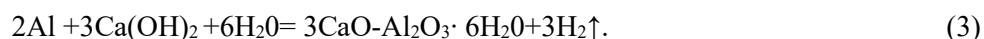
Величины удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Средняя плотность	кг/м ³	175	320	455	565	680	795
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°C)	2341	2167	2046	1917	1819	1749
Объемная теплоемкость	кДж/(м ³ ·°C)	409,7	693,3	930,7	1083,2	1236,8	1390,5

Полученные результаты по теплофизическим характеристикам газобетонных смесей позволяют дать оценку энергетического потенциала смесей за счет экзотермии реакции гидратообразования.

Исследования системы CaO - Al₂O₃ - H₂O согласуются с известными представлениями и свидетельствуют о том, что первой экзотермической

реакцией в смеси автоклавного газобетона является взаимодействие металлического алюминия и гидроксида кальция с образованием шестиводного гидроалюмината кальция и газообразного водорода:



В гидратирующихся системах теплоту гидратации приравнивают к изменению энтальпии реакции ΔH_0 в адиабатическом процессе. Энтальпия реакции (3) составляет $\Delta H_0 = -879,14$ кДж/моль или 16280 кДж тепла на 1 кг активного алюминия в смеси.

Второй экзотермической реакцией является гидратация извести:



Энтальпия данной реакции равна $\Delta H_0 = -63,7$ кДж/моль или 1136 кДж на 1 кг активного CaO в газобетонной смеси.

Третьим процессом, определяющим энергетический потенциал газобетонных смесей, является тепловыделение за счет гидратации цемента. На величину тепловыделения при гидратации цемента оказывает влияние минералогический состав клинкера.

Минералогический состав цемента и значения удельного тепловыделения при его гидратации приведены в таблице 6.

Таблица 6

Минералогический состав цемента и их удельное тепловыделение при гидратации

№ п/п	Наименование цемента	Содержание минералов, %				Удельное тепловыделение, кДж/кг
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
1	Новороссийский ЦЕМ I 42,5 Н	65	12	4	13	502
2	Белгородский ЦЕМ I 42,5 Н	61	17	5	12	505
3	Себряковский ЦЕМ I 42,5 Н	62	12	9	12	560

Для интегральной величины тепловыделения в процессе гидратации цемента существенное значение имеет содержание C₃A. У цемента Себряковский ЦЕМ I 42,5 Н количество C₃A составляет 12 % и величина удельного тепловыделения практически на 10 % или на 55 кДж/кг выше, чем у двух других низкоалюминатных цемента. Повышенная начальная температура газобетонной смеси (43 °С) и ее быстрый рост при выдерживании массива в камере предварительного твердения способствуют увеличению степени гидратации и значимости выделяемой энергии при гидратации цемента в термическом потенциале газобетонных смесей.

В процессе формирования структуры газобетонной смеси происходит изменение ее состава: алюминиевый газообразователь преобразуется в кальциевые гидраты; из оксида кальция образуется гидроксид; появляются первичные продукты гидратации цемента. Однако существенного изменения теплоемкости смесей за счет протекания реакций гидратообразования не происходит, так как удельная теплоемкость безводных компонентов и гидратных фаз находится на одинаковом уровне.

Энергетический потенциал газобетонных смесей марок по средней плотности от D100 до D600 приведен на рисунке 2.

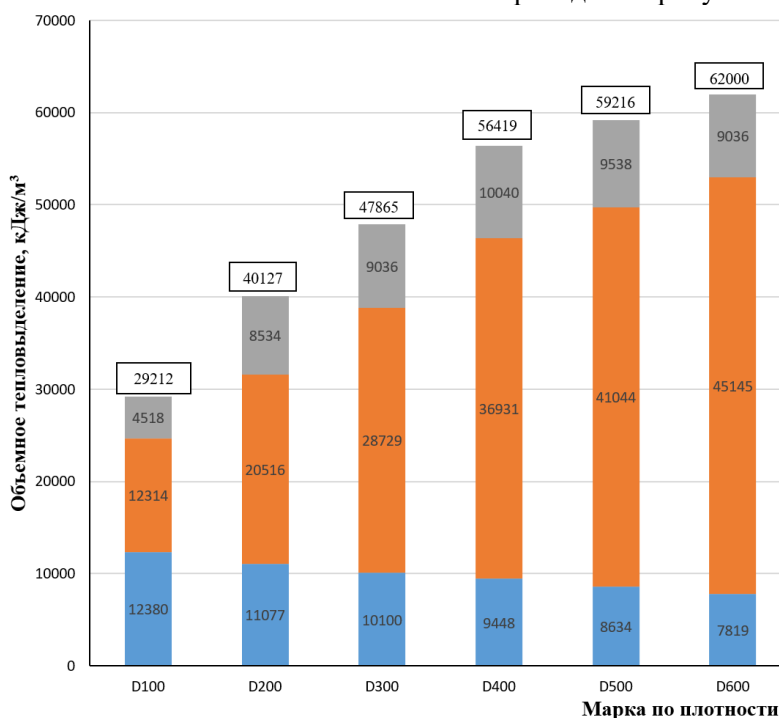


Рис. 2. Тепловыделение в газобетонных смесях: ■ – алюминий – газообразователь; ■ – оксид кальция; ■ – цемент ЦЕМ I 42,5 Н, □ – суммарный потенциал

По полученным данным (рис. 2), для низких марок газобетонных смесей по средней плотности ($D100$) существенный вклад на тепловыделение в смеси вносит реакция с алюминиевым газообразователем. Однако начиная с марки по средней плотности $D200$, величина тепловыделения реакции составляет уже четверть от суммарного объемного тепловыделения, а в газобетонной смеси для марки по средней плотности $D500$ – 15 %. Чем меньше проектная марка по средней плотности, тем существенней роль дисперсного алюминия в формировании теплового режима в газобетонной смеси.

Степень гидратации для цемента принята $\alpha = 0,2$. Вклад твердеющего цемента в суммарное тепловыделение при предварительном твердении массива для технологии автоклавного газобетона

незначительна. Для марок по плотности от $D200$ до $D600$ тепловыделение практически не меняется, составляя соответственно 8534 кДж/м^3 и 9036 кДж/м^3 .

Основную роль в формировании теплового режима массива играет негашеная молотая известь. Если для газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ экзотермия от реакций CaO и Al сопоставима, то уже для смесей марки по средней плотности $D200$ вклад CaO в суммарное тепловыделение в 2 раза больше. Для марки по средней плотности $D500$ объемное тепловыделение за счет извести составляет 41044 кДж/м^3 или 70 % от суммарного.

Приращения температуры в газобетонных смесях с марками по средней плотности от $D100$ до $D600$ приведены на рисунке 3.

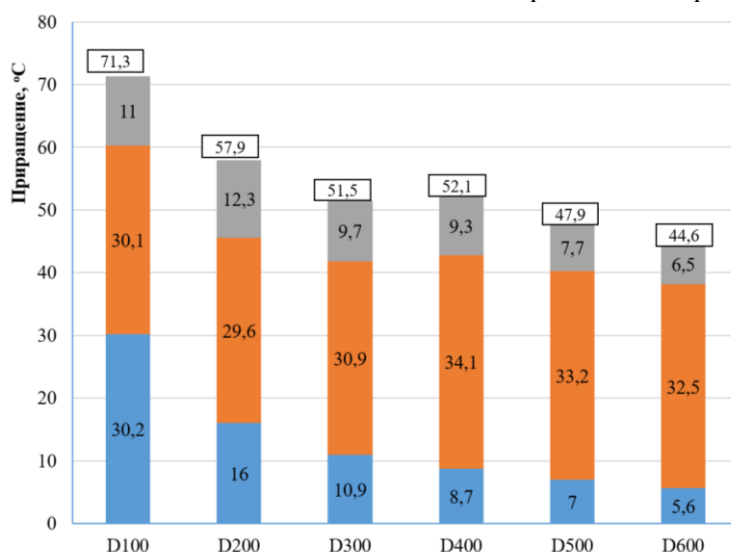


Рис. 3. Температурные приращения в газобетонных смесях: ■ – алюминий – газообразователь; ■ – оксид кальция; ■ – цемент ЦЕМ I 42,5 Н; □ – суммарный потенциал

На рисунке 4 даны расчетные температуры в газобетонных смесях и массиве для исходной

температуры смеси при ее заливке в форму, равной 43°C .

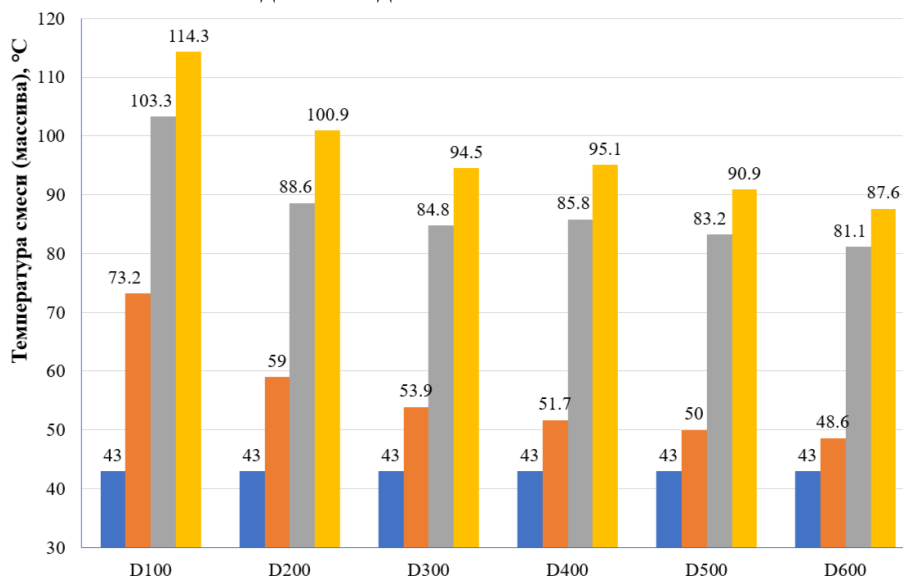


Рис. 4. Расчетные температуры в газобетонных смесях и массиве:

■ – заливка смеси в форму; ■ – газообразование в смеси; ■ – формирование первичной структуры (гидратация CaO); ■ – завершение структурообразования

Технологический процесс от момента заливки газобетонной смеси в форму до распаковки массива предлагается разделить на три стадии.

Первая – газообразование в смеси с формированием пористой структуры массива. Экзотермия в смеси за счет дисперсного алюминия наиболее значима для низких плотностей и составляет 30,2 °С у газобетонной смеси с маркой по средней плотности $D100$ или 42,4 % суммарного прироста температуры. У газобетонных смесей с маркой по средней плотности от $D300$ и выше экзотермия газообразователя повышает температуру газобетонной смеси менее чем на 10 °С, что составляет не более 20 % в суммарном градиенте температуры.

На второй стадии экзотермическим процессом является гидратация CaO с формированием коагуляционной структуры межпоровых перего-

родок. Заводы автоклавного газобетона замедляют гидратацию извести добавкой гипса. Тем самым разделяются этапы формирования пористой структуры и первичной структуры – пластической прочности массива. Независимо от марки по средней плотности приращение температуры смеси от гидратации CaO составляет величину порядка 30 °С.

Третьей стадией является завершение структурообразования в массиве за счет твердения цемента. Экзотермические реакции гидратации цемента способствуют, но не существенному, приращению температуры в газобетонной смеси. Образование игольчатых AFt и пластинчатых AFm -фаз придает газобетонному массиву пластическую прочность, необходимую для резки.

Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ и $D500$ при изменении водотвердого отношения приведены на рисунках 5, 6.

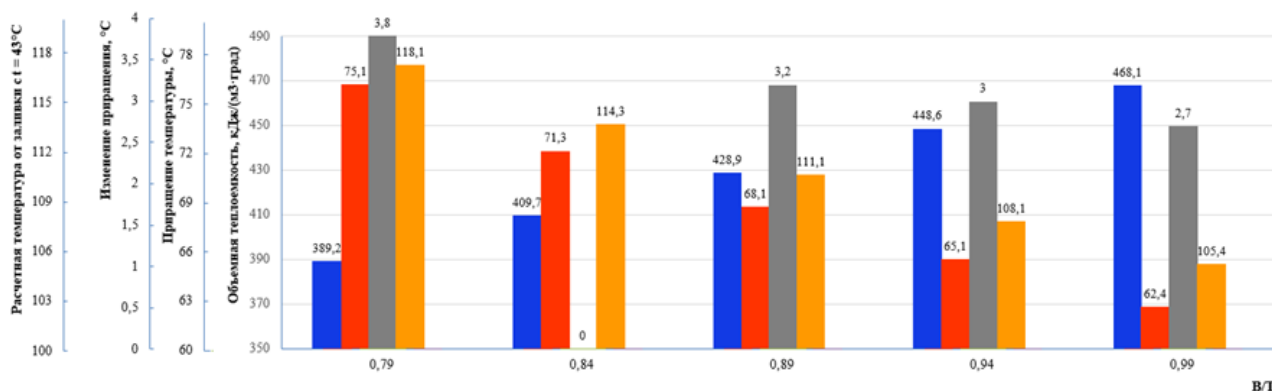


Рис. 5. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ при изменении водотвердого отношения: ■ – объемная теплоемкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43$ °С

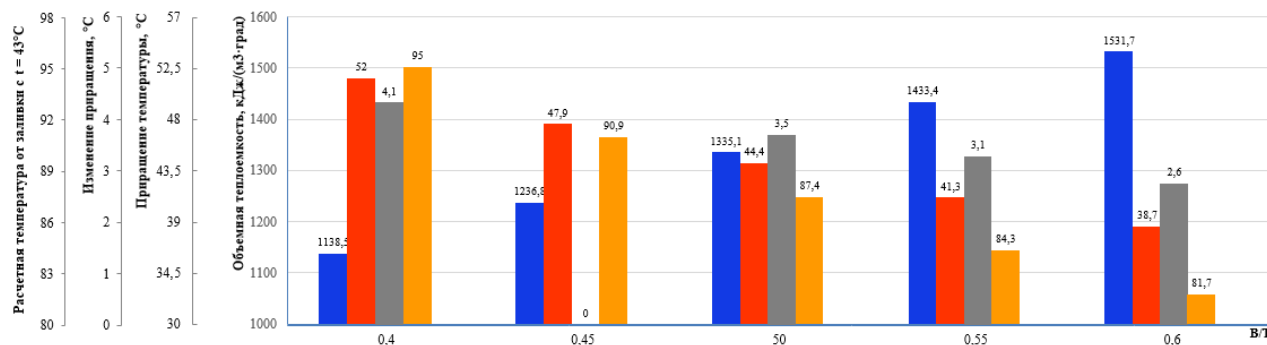


Рис. 6. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ при изменении водотвердого отношения: ■ – объемная теплоемкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43$ °С

Вода является самым теплоемким компонентом газобетонной смеси. Водотвердое отношение служит одним из основных факторов в технологии автоклавного газобетона: при высоком В/Т литевая технология, при низком В/Т – ударная. Количество воды в смеси можно рассматривать и как прием воздействия на температуру газобетонной смеси. Так в газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ увеличение В/Т с 0,4 до

0,6 снижает расчетную температуру смеси после предварительного твердения с 95,0 °С до 81,7 °С при начальной температуре заливки 43 °С (рис. 6). В газобетонной смеси с маркой по средней плотности $D100$ изменение В/Т с 0,79 до 0,99 снижает приращение температуры с 75,1 до 62,4 °С.

Из рецептурных характеристик существенное влияние на температуру газобетонной смеси

оказывает активность извести. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ при изменении активности извести приведены на рисунке 7, а для газобетонной смеси с

маркой по средней плотности $D100$ – на рисунке 8.

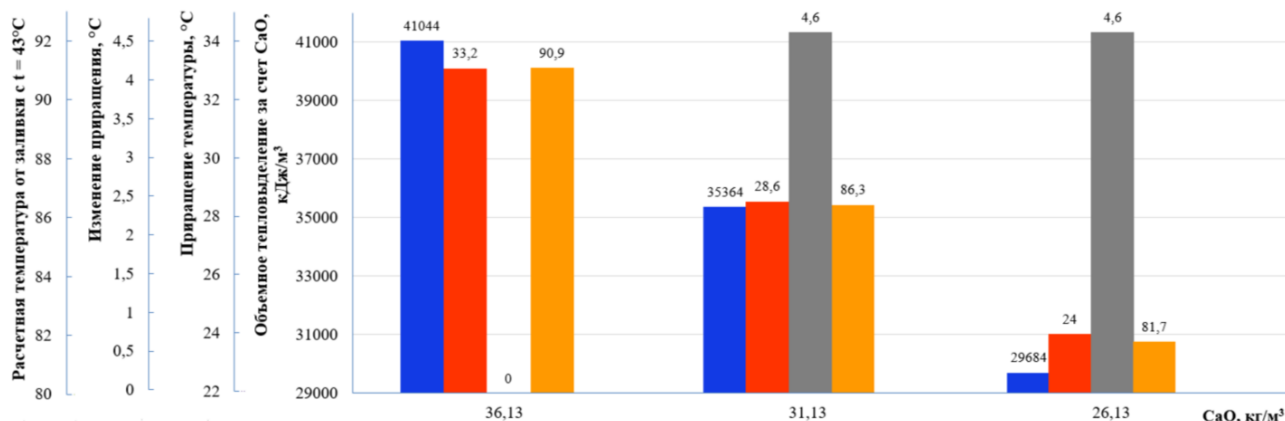


Рис. 7. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ при изменении активности извести:

■ – объемная теплоемкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43^\circ\text{C}$

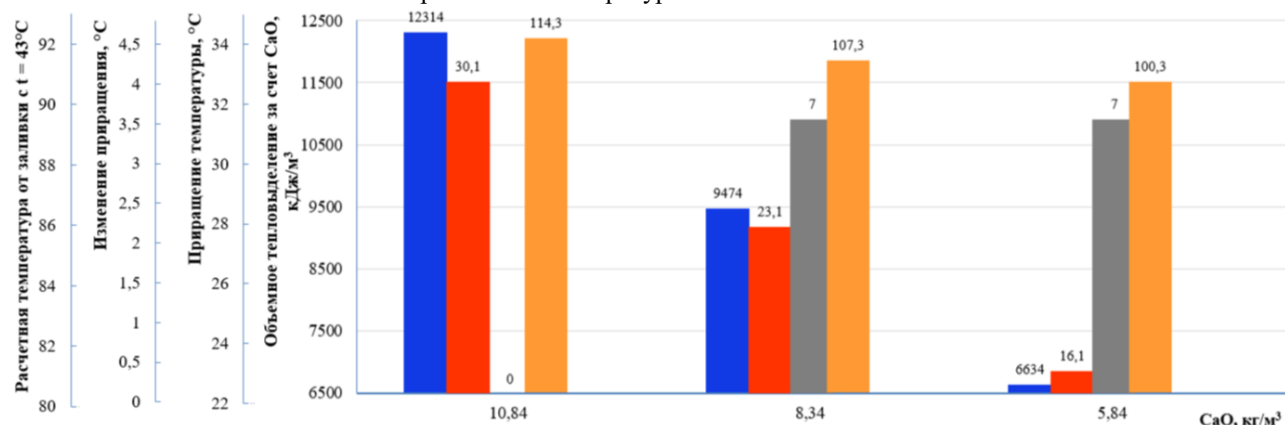


Рис. 8. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ при изменении активности извести:

■ – объемная теплоемкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43^\circ\text{C}$

В газобетонной смеси с маркой по средней плотности $D500$ изменение количества активного CaO на 1 kg/m^3 приводит к соответствующему изменению температуры газобетонной смеси на 1°C . При низких плотностях роль извести еще более значительна. Изменение количества извести в газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ на $2,5 \text{ kg/m}^3$ создает градиент температуры в 7°C .

Большое влияние на температуру газобетонной смеси оказывает начальная температура борта и днища формы.

Показатели для газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ в форме приведены в таблице 7.

Таблица 7

Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ в форме

Наименование	Смесь	Борт	Днище
Начальная температура, $^\circ\text{C}$	43,0	54,0	79,0
Теплоемкость, кДж/град	8387	1902	577
Температура после газообразования, $^\circ\text{C}$	50,0	54,0	79,0
Температура после гидратации CaO , $^\circ\text{C}$	75,6	75,6	79
Температура завершения выдержки массива, $^\circ\text{C}$	81,7		

При запуске технологии производства формы холодные, и значительное количество

тепла от экзотермических реакций в газобетонной смеси идет на их нагрев. В стабильном тех-

нологическом процессе температура борта принята 54 °С, днища 79 °С. При таких температурах формооснастки температура газобетонной смеси марки по средней плотности D500 снижается с 90,9 °С до 81,7 °С к моменту завершения выдержки и распалубки массива.

Выводы. Газобетонная смесь за счет экзотермических процессов взаимодействия дисперсного алюминия, гидратации извести и начального твердения цемента имеет высокий энергетический потенциал с расчетным увеличением температуры смеси свыше 90 °С. Основным вклад в тепловыделение в смеси вносит оксид кальция. Значимыми показателями для теплового режима массива являются проектная марка по средней плотности, расход извести и водотвердое отношение. Расход тепла газобетонной смеси на нагрев формы и окружающей среды является негативным фактором, создающим термический градиент в массиве и связанные с этим напряжения. Использование энергетического потенциала газобетонных смесей позволит увеличить производительность технологической линии, снизить расход вяжущего за счет положительного эффекта на прочностные характеристики газобетона. Управление теплофизическими характеристиками позволит повышать качество выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гринфельд Г.И., Коркина Е.В., Пастушков П.П., Павленко Н.В., Ерофеева И.В. Система ограждающих конструкций, обеспечивающая повышенное энергосбережение в зданиях // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 3(43). С. 25–35.
2. Сулейманова Л.А., Коломацкий А.С., Погорелова И.А., Марушко М.В. Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 34–42.
3. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Кондрашев К.Р., Сулейманов К.А., Пириев Ю.С. Энергосберегающие газобетоны на композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 73–83.
4. Micheli E., Ferretti D., Miccoli L., Parisi F. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 402. 132996. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.132996
5. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.
6. Шабров А.А., Гаркави М.С. Эволюция активных центров в процессе твердения вяжущих веществ // Цемент. 2000. № 1. С. 17–19.
7. Fratini E. Hydration water and microstructure in calcium silicate and aluminate hydrates / Emiliano Fratini, Francesca Ridi, Sow-Hsin Chen, Piero Baglioni // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. Vol. 18. No. 36. Pp. 2467–2483.
8. Украинский И.С., Каменчуков А.В. Динамика набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего [Электронный ресурс]. // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2. URL: <https://ts.today/PDF/07SATS220.pdf>.
9. Khunt Y., Nathwani V., Patel H., Joshi T., Gandhi D. Investigation on properties of autoclave aerated concrete using different pre-curing and curing techniques // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI:10.1016/j.matpr.2023.04.047.
10. Kamal M.A. Analysis of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Blocks with Reference to its Potential and Sustainability // Journal of Building Materials and Structures. 2020. No. 7. Pp. 76–86. DOI:10.5281/zenodo.3950489
11. Kalpana M., Mohith S., Study on autoclaved aerated concrete: review // Mater. Today. 2019. No. 22. Pp. 894–896.
12. Сулейманова Л.А. Газобетон неавтоклавно твердения на композиционных вяжущих. дис. ... доктора технических наук. Белгород, 2013. 390 с.
13. Xia J., Chen Y., Chen J., Li A., Chen T. Preparation of autoclaved aerated concrete from construction waste // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. No. 687. Pp. 1–6.
14. Chen Y.L., Chang J.E., Lai Y.C., Chou M.I.M. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions // Constr. Build. Mater. 2017. No. 153. Pp. 622–629.
15. Ropelewski L., Neufeld R.D. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete // J. Energy Eng. 1999. No. 125(2) P. 59–75. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9402
16. Schreiner J., Jansen D., Ectors D., Goetz-Neunhoeffler F., Neubauer J., Volkmann S. New analytical possibilities for monitoring the phase development during the production of autoclaved aerated concrete // Cement Concr. Res. 2018. No. 107. Pp. 247–252. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.02.028

Информация об авторах

Сулейманов Карим Абдуллаевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: karimsuleymanov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Погорелова Инна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 04.10.2023 г.

© Сулейманов К.А., Погорелова И.А., 2023

***Suleymanov K.A., Pogorelova I.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: karimsuleymanov@mail.ru*

ENERGY POTENTIAL OF AERED CONCRETE MIXTURES

Abstract. *The energy potential of aerated concrete mixtures is a characteristic that reflects the ability of materials to release thermal energy during their processing or reaction. This potential depends on the composition of the mixture and other factors such as the heat capacity of the components and the hydration process. In the context of aerated concrete materials, which are widely used in construction, energy potential plays an important role in their production and application, influencing the thermal performance of the material and the ability to store or release heat depending on environmental conditions and processes. In this work, the authors conducted a study of the influence of the composition of the mixture on its energy efficiency. The study presents an analysis of production technologies and recipes used at various enterprises. Particular attention is paid to assessing the nominal compositions of aerated concrete mixtures for materials of different densities, taking into account the main components of aerated concrete mixtures that affect the energy potential. The heat capacity of aerated concrete mixtures is also analyzed taking into account the mass content of the components. Studying the energy potential of aerated concrete mixtures makes it possible to more effectively manage production processes, optimize energy consumption and use the material in various conditions, taking into account its thermal properties.*

Keywords: *aerated concrete mixture, binder, thermophysical characteristics, volumetric heat capacity, thermal potential.*

REFERENCES

1. Grinfeld G.I., Korkina E.V., Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Erofeeva I.V. System of enclosing structures that ensure increased energy saving in buildings [Sistema ograzhdayushchih konstrukcij, obespechivayushchaya povyshennoe energosberezhenie v zdaniyah]. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. 2016. No. 3(43). Pp. 25–35. (rus)
2. Suleymanova L.A., Kolomatsky A.S., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Increasing the efficiency of production and application of cellular concrete [Povyshenie effektivnosti proizvodstva i primeneniya yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 34–42. (rus)
3. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kondrashev K.R., Suleymanov K.A., Piriev Yu.S. Energy-saving aerated concrete with composite binders [Energosberegayushchie gazobetonny na kompozitsionnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 73–83. (rus)
4. Michelini E., Ferretti D., Miccoli L., Parisi F. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 402. 132996. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.132996.
5. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete [Upravlenie processom formirovaniya poristoj struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)
6. Shabrov A.A., Garkavi M.S. Evolution of active centers in the process of hardening of binders [Evoluciya aktivnyh centrov v processe tverdeniya vyazhushchih veshchestv]. Cement. 2000. No. 1. Pp. 17–19. (rus)
7. Fratini E. Hydration water and microstructure in calcium silicate and aluminate hydrates / Emiliano Fratini, Francesca Ridi, Sow-Hsin Chen, Piero Baglioni. J. Phys.: Condens. Matter. 2006. Vol. 18. No. 36. Pp. 2467–2483.

8. Ukrainsky I.S., Kamenchukov A.V. Dynamics of strength gain of artificial stone based on cement binder [Electronic resource]. Internet magazine "Transport Facilities", 2020 No. 2. URL: <https://ts.today/PDF/07SATS220.pdf>. (rus)
9. Khunt Y., Nathwani V., Patel H., Joshi T., Gandhi D. Investigation on properties of autoclave aerated concrete using different pre-curing and curing techniques. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI:10.1016/j.matpr.2023.04.047.
10. Kamal M.A. Analysis of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Blocks with Reference to its Potential and Sustainability. *Journal of Building Materials and Structures*. 2020. No. 7. Pp. 76–86. DOI:10.5281/zenodo.3950489.
11. Kalpana M., Mohith S., Study on autoclaved aerated concrete: review. *Mater. Today*. 2019. No. 22. Pp. 894–896.
12. Suleymanova L.A. Non-autoclaved aerated concrete with composite binders [Gazobeton neavtoklavnogo tverdeniya na kompozicionnyh vyazhushchih]. dissertation ... Doctor of Technical Sciences. Belgorod, 2013. 390 p. (rus)
13. Xia J., Chen Y., Chen J., Li A., Chen T. Preparation of autoclaved aerated concrete from construction waste. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. No. 687. Pp. 1–6.
14. Chen Y.L., Chang J.E., Lai Y.C., Chou M.I.M. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions. *Constr. Build. Mater.* 2017. No. 153. Pp. 622–629.
15. Ropelewski L., Neufeld R.D. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete. *J. Energy Eng.* 1999. No. 125(2) Pp. 59–75. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9402
16. Schreiner J., Jansen D., Ectors D., Goetz-Neunhoeffler F., Neubauer J., Volkmann S. New analytical possibilities for monitoring the phase development during the production of autoclaved aerated concrete. *Cement Concr. Res.* 2018. No. 107. Pp. 247–252. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.02.028.

Information about the authors

Suleymanov, Karim A. Assistant. E-mail: karimsuleymanov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pogorelova, Inna A. PhD, Assistant professor. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 04.10.2023

Для цитирования:

Сулейманов К.А., Погорелова И.А. Энергетический потенциал газобетонных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-8-17

For citation:

Suleymanov K.A., Pogorelova I.A. Energy potential of aered concrete mixtures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 11. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-18-26

Мокрова М.В., Сардарова С.А.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: mokrova2017@yandex.ru*

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПСОВОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены результаты исследований по применению модифицирующих добавок в гипсовое вяжущее. Регулирование структуры и, следовательно, свойств гипсового камня можно осуществлять с помощью малых количеств высокоактивных добавок, способных эффективно влиять на формирование структуры гипсового камня, и, следовательно, и на его характеристики. Используя функциональные модифицирующие добавки в малых количествах, практически не влияющих на стоимость материала, и управляя с их помощью составом гипсовых вяжущих можно получать эффективные декоративно-отделочные гипсовые изделия с улучшенными характеристиками.

В работе было изучено влияние добавок поливинилацетата совместно с синтетической полипропиленовой фиброй на свойства изделий из гипсового камня. Приведено сравнение физико-механических характеристик модифицированных гипсовых композитов, выявлены преимущества при введении фибры. За счет перекрытия волокнами фибры пор и капилляров гипсового камня существенно снижается образование усадочных микротрещин, повышается трещиностойкость, увеличиваются прочностные характеристики.

Установлено, что модификация гипсового камня поливинилацетатом совместно с синтетическими волокнами способствует повышению физико-механических характеристик гипсового камня. Разработанные составы декоративно-отделочных гипсовых плиток с применением добавок поливинилацетата и полипропиленовой фибры позволяют получать гипсовые отделочные материалы изделия с улучшенными характеристиками, что демонстрирует их повышенную эффективность как современного отделочного материала и открывает широкие перспективы применения в жилищном и гражданском строительстве.

Ключевые слова: гипсовый камень, модификация, добавки, поливинилацетат, синтетическая фибра.

Введение. Гипсовые вяжущие в строительстве имеют ряд преимуществ по сравнению с другими минеральными вяжущими. Производство вяжущих из гипса характеризуется относительно низкими технологическими энергозатратами, отсюда – более низкая стоимость вяжущих из гипса по сравнению с прочими. Среди достоинств гипсовых вяжущих можно также отметить следующие: экологическая безопасность, хорошие термо- и звукоизоляционные свойства отвержденного камня, огнестойкость, простота применения, не требующая сложного оборудования и техники. Особо важным свойством гипсовых вяжущих веществ является скорость их твердения и схватывания, что объясняет высокую производительность производственных поточных линий [1, 2].

К недостаткам гипсовых материалов относятся повышенное водопоглощение, высокий коэффициент размягчения, невысокая трещиностойкость и хрупкость изделий из гипса, особенно длинномерных. При производстве изделий из гипса: декоративно-отделочных плиток, фигурных изделий, потолочной лепнины и розеток и других изделий образуется много брака.

Тенденция развития промышленности строительных материалов РФ на данный момент

направлена на расширение номенклатуры высокоэффективных строительных материалов и изделий, которые повышали бы качество комфортной среды обитания человека, а технологии их производства являлись бы малоотходными [3, 4]. Создание новых материалов было и остается основой технологического развития и разработки инновационных продуктов строительной отрасли. Они позволяют, как совершенствовать современные строительные технологии, делая их более эффективными и экономически выгодными, так и реализовывать принципиально иные, прорывные технологические решения [5].

Гипсовые материалы и изделия являются широко используемыми в строительстве, а учитывая современную тенденцию – «Эко-строительство», их востребованность растет, поскольку гипс в полной мере удовлетворяет требованиям экологии и охраны окружающей среды. Гипс в настоящее время является основным отделочным материалом жилищного домостроения, а его роль в реставрационных работах и ремонте исторических зданий трудно переоценить.

Важной и актуальной задачей в настоящее время является повышение эффективности изделий на основе гипсового вяжущего путем созда-

ния новых композитных материалов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Большая роль в этом направлении принадлежит микроармированию с помощью фибры (волокон). Микроармирование осуществляют различными видами фибр. В цементных растворах и бетонах наиболее часто используют металлическую фибру разной конфигурации, а также, минеральные микроволокна, полимерную фибру и реже стекловолокно.

Около одной трети перерабатываемого полимерного сырья используются для изготовления синтетических волокон [6]. Из анализа технической литературы, многочисленных исследований и полученных ранее результатов можно сделать вывод о том, что одним из способов стабилизации структуры и повышения трещиностойкости минеральных вяжущих является введение армирующих волокон [7–9]. Таким образом, перспективным направлением в строительном материаловедении является применение фибры. На сегодняшний день многие российские ученые (Пухarenко Ю.В., Пашенко А.А., Коровяков В.Ф. и др.) занимаются вопросами применения армирующих волокон в минеральных композиционных материалах, в том числе, в гипсовых, обеспечивая трехмерное упрочнение композитов. Для гипсовых изделий применение металлической фибры не желательно, поскольку есть опасность возникновения коррозии фибры в гипсовом камне. Для гипсовых материалов и изделий наиболее целесообразна полимерная фибра – легкая, гибкая, химически инертная.

Авторами [10–12] на основе экспериментальных исследований были установлены зависимости влияния основных рецептурных и технологических факторов на структурообразование гипсового камня в присутствии нано- и микроразмерных минеральных добавок и модификаторов. Рядом интересных инновационных разработок ученых в последние годы отмечен существенный вклад в науку о наноструктурировании гипсовых материалов [13–15].

Разработка современных методов проектирования состава гипсовых материалов и смесей на их основе основана на результатах фундаментальных исследований, осуществленных рядом известных российских ученых: Волженским А.В., Ферронской А.В., Гончаровым Ю.А., Коровяковым В.Ф., Бурьяновым А.Ф., Баженовым Ю.М., Петропавловской В.Б., Королевым Е.А., Яковлевым Г.И., Первушиным Г.Н., Деревянко В.Н., Чумаком А.Г., Дребезговой М.Ю., Чернышевой Н.В., и рядом других ученых.

На основании последних исследований и разработок у ученых и исследователей сложи-

лось мнение о возможности улучшении ряда технических и эксплуатационных характеристик гипсовых материалов и изделий путем микроармирования и воздействия на кристаллическую структуру микро- и наномодифицирующими добавками. О совместном применении указанных способов модификации на гипсовый камень сведений недостаточно, и они носят обрывочный характер. Систематических исследований в этом направлении очень мало.

Цель работы – улучшение эксплуатационных характеристик декоративно-отделочных изделий на основе высокопрочного гипсового вяжущего путем микроармирования полимерной фиброй в сочетании с воздействием поверхностно активной модифицирующей добавки поливинилацетата на кристаллическую структуру гипса.

Материалы и методы. В работе [16] проводились исследования по изучению влияния микродобавок бутадиен-стирольного латекса на свойства гипсового камня. В дальнейшем возникла необходимость выбора более дешевого и доступного материала, заменяющего синтетический бутадиен-стирольный латекс. Широко известный в строительстве поливинилацетат (эмульсия ПВА) является густой непрозрачной жидкостью белого цвета, которая имеет некоторый характерный запах, полностью исчезающий после высыхания. Благодаря своим свойствам ПВА используется во многих отраслях промышленного производства и в строительстве. Удобство при использовании ПВА состоит в том, что состав разбавляется обычной водой, при этом сохраняется характерная для ПВА высокая адгезия к целому ряду материалов. По стоимости ПВА выгодно отличается от других аналогичных синтетических продуктов. Совокупность ряда достоинств поливинилацетата делает его широко востребованным в строительных технологиях. К ним относятся и такие преимущества, как устойчивость эмульсии в условиях перепадов температур, высокая прочность сцепления с различного рода поверхностями, экологическая безопасность и др.

На рисунке 1 представлена оптическая микрфотография морфологии концентрированной эмульсии ПВА. Тонкодисперсная эмульсия содержит дисперсионно окрашенные сферы диаметром от 0,3 мкм до 1 мкм. Обнаружена тенденция сферических микрочастиц к микрофазовому разделению: цепочечные структуры (из сфер одной дисперсионной окраски), формируют границы вокруг химически однородных областей (иной окраски). Наиболее явно это заметно и установлено при исследовании раствора эмульсии ПВА в режиме фазового контраста (рис. б).

Наличие поверхностно активных сфер малого диаметра позволяет предположить влияние

эмульсии ПВА на формирование микрокристаллов гипса при его гидратации и осаждении из пересыщенного водного раствора.

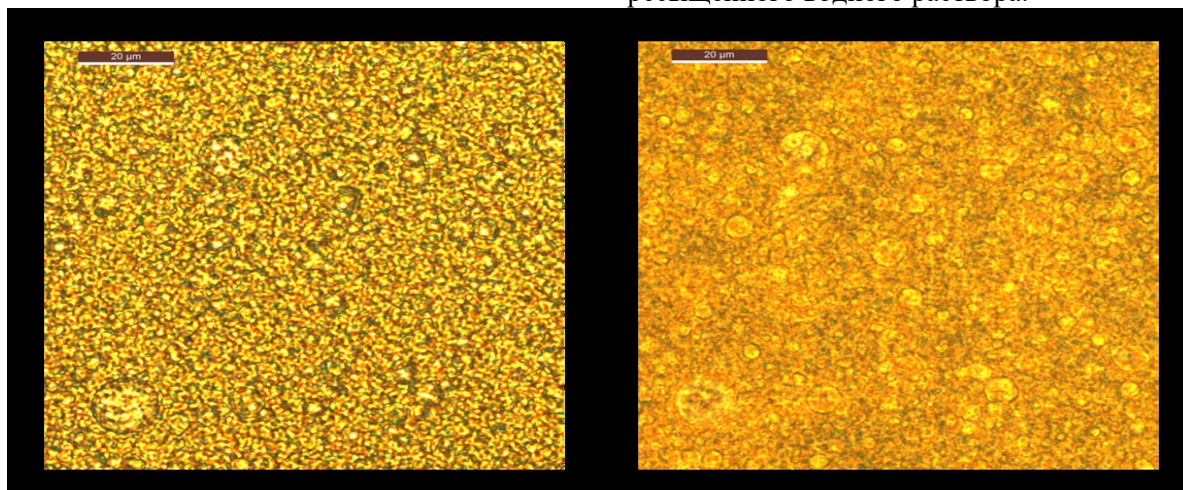


Рис. 1. Оптические микрофотографии эмульсии ПВА:
а) светлое поле, б) фазовый контраст. Размер кадра: 108×108 мкм

В исследованиях были использованы следующие материалы и методы испытаний.

1. Гипсовое вяжущее Г-16, гипс скульптурный высокопрочный, нормального твердения, среднего помола, по ГОСТ 125–2018. Вяжущие гипсовые. Технические условия. Водогипсовое отношение теста нормальной густоты 0,39. Производитель – Самарский гипсовый комбинат.

2. Строительная эмульсия ПВА марки Д50Н по ГОСТ 18992–80. Дисперсия поливинилацетатная гомополимерная, грубодисперсная, низковязкая (50 – минимальное содержание сухого остатка).

3. Полипропиленовая фибра АрмМикс длиной 12 мм, толщиной 20–25 мкм.

Добавки ПВА и полипропиленовых волокон

вводили в малых количествах: 0,1–0,2 % по массе от массы гипсового вяжущего в воду затворения, тщательно перемешивали.

Для определения характеристик модифицированных гипсовых составов были использованы стандартные образцы-балочки размерами 40×40×160 мм по ГОСТ 23789-2018. Гипсовые вяжущие. Методы испытаний, изготовленные в строгом соответствии с п.7.1, 7.2 и 7.3.1.

Было исследовано влияние добавок на характеристики гипсового камня, в том числе, на прочность, среднюю плотность, водопоглощение и водостойкость.

Составы полученных образцов гипсового камня представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики гипсовых образцов

№ п/п	Составы образцов	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Предел прочности при изгибе, $R_{изг}$, МПа	Предел прочности при сжатии высушенных образцов, $R_{сж\text{ сух.}}$, МПа	Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, $R_{сж\text{ насыщ.}}$, МПа	Водопоглощение по массе, через 4 час., W , %	Коэффициент размягчения, $K_{разм.}$	Коэффициент конструктивного качества, ККК
1	Г-16, контрольный	1550	6,3	35,3	15,5	17,9	0,44	22,8
2	Г-16+0,5% ПВА	1489	6,4	32,3	14,9	16,1	0,46	21,7
3	Г-16+0,5% ПВА+0,1% ПФ	1476	8,1	37,0	17,4	15,9	0,47	25,1
4	Г-16+0,5% ПВА+0,2% ПФ	1475	7,6	38,4	18,0	16,5	0,47	26,0
5	Г-16+1,0% ПВА	1483	6,7	33,4	16,0	16,0	0,48	22,5
6	Г-16+1,0% ПВА+0,1% ПФ	1472	7,5	39,1	18,4	16,3	0,47	26,6
7	Г-16+1,0% ПВА+0,2% ПФ	1470	7,7	39,8	18,3	16,1	0,46	27,1

Исследование микроструктуры модифицированных гипсовых образцов осуществляли методом электронной растровой сканирующей микроскопии с помощью приборной установки марки *TESCAN VEGA 3SEM* (Чехия).

На рис. 2. представлены электронные фотографии микроструктуры исследованных образцов гипсового камня – исходного: а) и в) и модифицированного 2% масс. поливинилацетатом: б) и г).

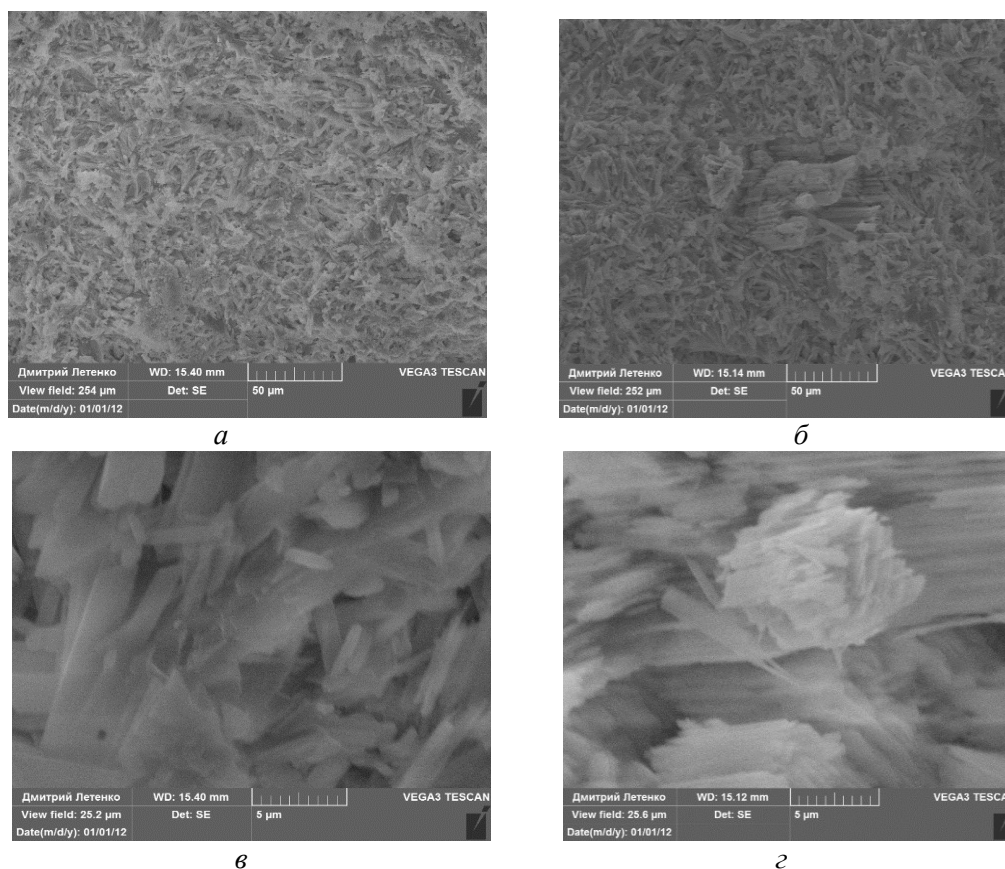


Рис. 2. Электронные фотографии микроструктуры гипсового камня:

а, в – контрольный образец, увеличение $\times 1000$ и $\times 10000$ крат, соответственно;
б, г – образец, модифицированный поливинилацетатом 0,2% масс., увеличение $\times 1000$ и $\times 10000$ крат, соответственно

Обсуждение результатов. Испытания высушенных до постоянной массы в сушильном шкафу при $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ стандартных гипсовых образцов-балочек проводили спустя 7 суток. Определение характеристик проводили в строгом соответствии с ГОСТ 23789-2018. Гипсовые вяжущие. Методы испытаний. Физико-механические характеристики определяли согласно п. 7.3.2, 7.3.3. и 7.4. Водопоглощение образцов определяли согласно п.10.

На основании полученных данных (табл. 1) можно установить, что модифицирующие микродобавки повлияли на структуру и плотность гипсового камня: плотность гипсового камня снизилась во всех случаях, максимально на 5 %. При этом водопоглощение также снизилось у всех образцов с добавками (максимально на 13 %), коэффициент размягчения материала улучшился (на 3–4 %), что, возможно, указывает на гидрофобизирующий эффект добавки ПВА в гипсовом камне, либо, в данном случае, имеет место перераспределение пористости в сторону

снижения открытой пористости и увеличения количества замкнутых (закрытых) пор.

В целом, у модифицированного гипсового камня установлены прочностные характеристики, отличающие в лучшую сторону от характеристик контрольного образца. Прочность при сжатии сухих образцов с ПВА и фиброй № 3, 4 и 6, 7 увеличилась, максимально на 13 %. Прочность при изгибе выросла у всех модифицированных образцов, но в образцах с фиброй наиболее значительно, максимально на 29 %). Скорее всего, наибольший вклад в данный показатель имеет фибра. При этом количество фибры в диапазоне от 0,1 до 0,2 % масс. практически не повлияло на показатель. Прочность при сжатии водонасыщенных образцов также оказалась выше контрольного (кроме образца № 2), максимальное увеличение прочности образцов с фиброй на 17 %. Прочность при сжатии водонасыщенных образцов только с добавкой ПВА снизилась (образец № 2, на 4 %), либо осталась практически

без изменения (образец № 5). Причем, с увеличением содержания ПВА в гипсовом материале упрочняющее влияние фибры сказалось значительнее, что может предполагать синергетический эффект влияния фибры на прочность гипсового камня в присутствии ПВА.

Анализируя данные электронной микроскопии по микроструктуре исходного (контрольного) образца и образца, модифицированного поливинилацетатом, можно заметить появление в кристаллических сростках последнего не характерных для контрольного образца сферических мелкокристаллических образований и не характерной для гипса сферолитной структуры (рис. 2 б и 2 г), а также редких укрупненных пластин лепесткового типа в виде сростков микрокристаллов гипса (рис. 2 б, г). Учитывая способность дигидрата сульфата кальция наследовать кристаллический характер субстрата (подложки) при его кристаллизации из пересыщенного раствора, можно предположить гетероэпитаксиальный рост кристаллитов гипса на поверхности эмульсионных микрочастиц поливинилацетата (сферические и сферолитные кристаллические образования напоминающие по форме сферолиты, характерные для полипропилена) и гомоэпитаксию на частицах осажденного дигидрата сульфата кальция. (*Эпитаксия* – рост кристаллографически одинаково ориентированных монокристаллических слоев на кристаллические слои подложки или друг на друга; *гомоепитаксия* – на

подложке из того же вещества, что и растущий слой; *гетероэпитаксия* – на подложке иного вещества). Это предположение подтверждает то, что в большинстве микроструктура модифицированного гипсового камня практически не меняется, либо эти изменения не значительны.

О гетероэпитаксиальном росте кристаллов гипса на поверхности полипропиленового волокна также свидетельствует рисунок 3 а и б. Поверхность полипропиленового волокна фибры покрыта мелкими кристаллами гипса, не смотря на гидрофобный характер поверхности полипропилена. Полипропилен, являясь предельным углеводородом парафинового ряда с ковалентными неполярными связями, как правило, не имеет адгезии к большинству поверхностно заряженных материалов. Вероятно, что наличие мелких кристалликов на поверхности волокна улучшает сцепление химически инертного полипропиленового волокна с гипсовым камнем. Можно заметить, что не вся поверхность волокна, а только её часть покрыта кристаллами гипса, что лишнее раз указывает на гидрофобный характер поверхности данного материала. Но даже частичное покрытие поверхности волокон микрокристаллами гипса позволяет волокнам фибры выполнять роль армирующего компонента в системе композита и повысить его прочностные характеристики.

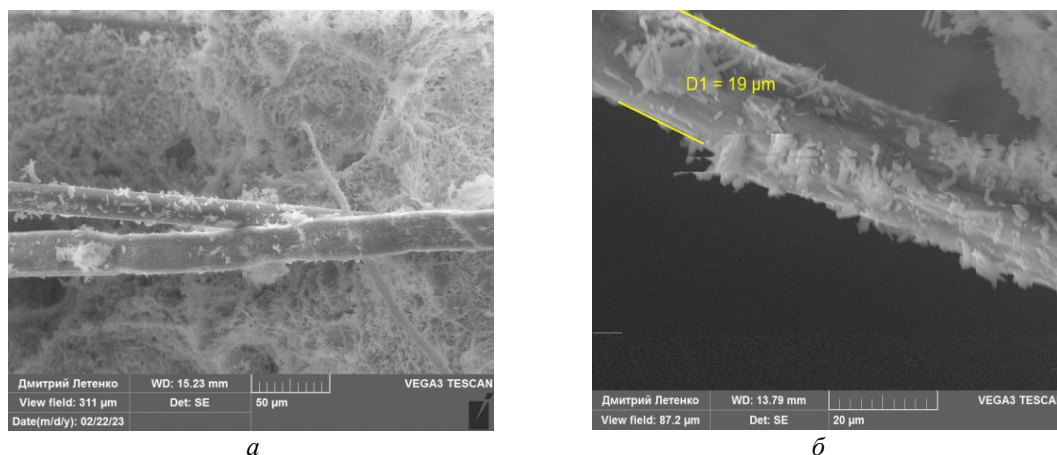


Рис. 3. Электронные микрофотографии образцов гипса, модифицированного полипропиленовой фиброй:
 а – микроструктура гипсового камня с полипропиленовыми волокнами, увеличение $\times 1000$ крат;
 б – полипропиленовое волокно фибры в структуре гипса: гетероэпитаксиальный рост микрокристаллов гипса на поверхности полипропиленового волокна фибры, увеличение $\times 2500$ крат

Выводы. В результате проведенных исследований установлена эффективность использования микродобавок ПВА и синтетической полипропиленовой фибры на прочностные характеристики и водопоглощение модифицированных гипсовых образцов. При этом совместное использование указанных добавок оказалось более

эффективным, что позволяет судить о синергетическом эффекте при совместном использовании указанных модификаторов гипсового вяжущего.

Методом электронной микроскопии установлен эпитаксиальный рост микрокристаллов гипса на поверхности полипропилена, что очевидно повышает сцепление полипропиленовых

волокон фибры с гипсовым камнем. При этом кристаллическая микроструктура гипсового камня не меняется под воздействием волокон полипропилена, волокна выполняют исключительно армирующую функцию в гипсовом композите. Поливинилацетат, напротив, способен влиять на микроструктуру гипса, но учитывая его малое количество в данной системе (от 0,1 до 0,2 % масс.), это влияние на общую кристаллическую структуру гипсового камня сказывается не значительно.

Модификация добавками поливинилацетата и полипропиленовой фибры в количествах, не превышающих 0,2 % масс. высокопрочного гипсового вяжущего марки Г-16 практически не сказывается на стоимости декоративно-отделочных изделий (лепнины, потолочных розеток, декоративно-отделочных плиток и др.), но, в то же время, позволяет снизить водопоглощение гипсового камня на 13 %, коэффициент размягчения повысить на 4 %, также увеличить прочность при сжатии на 13–17 %, а прочность при изгибе повысить на 28 %. Следует особо подчеркнуть, что увеличение прочности при изгибе декоративно-отделочных гипсовых изделий и лепнины особенно актуально с учетом хрупкости длинномерных гипсовых изделий. За счет перекрытия волокнами фибры пор и капилляров гипсового камня вероятно снижается образование усадочных микротрещин, при этом повышается трещиностойкость гипсового камня, что, в свою очередь, приводит к увеличению прочностных характеристик. Снижение плотности гипсового камня также весьма полезно для отделочных изделий, так как снижает общий вес лепнины и отделочных плиток, что делает их монтаж более удобным. Повышение прочностных характеристик при снижении плотности гипсового камня, вероятно, происходит вследствие изменений траекторий и величины развития микротрещин под нагрузкой из-за присутствия фибры. Повышение прочности при изгибе позволяет рассчитывать на повышение качества, снижение количества трещин и брака длинномерных гипсовых декоративно-отделочных изделий и лепнины.

Важной характеристикой в строительном материаловедении является коэффициент конструктивного качества, определяемый как отношение прочности при сжатии к плотности материала (ККК). Этот параметр позволяет оценить строительный материал с точки зрения наименьших изменений напряжения в конструкции в условиях эксплуатации, минимизировать риски и повышать надежность конструкции в целом, также ККК позволяет оценить эффективность деталей конструкции. В результате предложенной

модификации ККК модифицированного гипса повысился максимально на 19 %.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность получения эффективных и широко востребованных строительных декоративно-отделочных изделий на основе стандартного высокопрочного гипсового вяжущего Г-16 с улучшенными прочностными показателями и сниженным водопоглощением, улучшенным коэффициентом размягчения, сниженным весом, и практически не требующая материальных затрат.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках гранта на проведение научно-исследовательских работ обучающимися СПбГАСУ по направлению «Строительство и жилищно-коммунальное хозяйство» № 46С23.

Благодарности. Электронные микрофотографии микроструктуры образцов гипса выполнены доцентом кафедры технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ Летенко Дмитрием Георгиевичем. Авторы выражают благодарность Дмитрию Георгиевичу за оказанную помощь в исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kirghizbayev A.T. The effect of carbonate fillers on the properties of anhydrite binder and gypsum stone Kirghizbayev // Механика и технологии. 2023. No. 1(79). Pp. 24–27. DOI:10.55956/NYIA5819.
2. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R. Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder // Smart and Sustainable Built Environment. 2021. Vol. 10, No. 4. Pp. 702–710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.
3. Иванюк Д.М., Шаталова С.В. Регулирование свойств пенобетонных изделий на основе композиционного гипсового вяжущего // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгород, 04–05 декабря 2019 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 561–565.
4. Чернышова Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю., Кладиева Д.М. К вопросу применения гипсовых композиционных материалов для зеленого строительства // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства Сборник докладов международной научнопрактической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславо-

вича Лесовика: В 3 частях. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 327–332.

5. Стенин А.А., Лесовик В.С. Композиционные материалы на основе природных армирующих волокон // Современные технологии деревообрабатывающей промышленности: Материалы международной научно-практической онлайн-конференции, Белгород, 15–16 февраля 2018 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 315–320.

6. Халипаева С.И., Мамаджанов И.Б., Урозова Д.Д. Исследование влияния функциональных добавок на прочность гипсового камня, дисперсно-армированного синтетическим волокном // Проблемы современной науки и образования. 2019. № 10(143). С. 36–38. DOI: 10.24411/2304-2338-2019-11001.

7. Пухаренко Ю.В., Ковалева А.Ю., Сидорова А.С., Эшанзада С.М. Стабилизация структуры твердеющего высокопрочного бетона армирующими волокнами // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 9–13. DOI 10.33622/0869-7019.2022.05.09-13.

8. Толибова В.И. Полипропиленовая фибра – эффективная армирующая добавка // Сборник материалов XVII Междунар. молодежной науч.-практ. конф. Новосибирск: Центр развития научного сотрудничества, 2017. С. 123–126.

9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharens Y.V. Fiber concrete for industrial and civil construction // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945 P. 120–124. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.120.

10. Гусев Б.В., Гришина А.Н., Королев Е.В. Особенности структурообразования гипсового вяжущего, модифицированного гидросиликатами цинка // Промышленное и гражданское

строительство. 2020. № 2. С. 40–46. DOI:10.33622/0869-7019.2020.02.40-46.

11. Grishina A., Korolev E. Structure formation of gypsum binder with zinc hydrosilicates // E3S Web of Conferences: 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018, Moscow, 03–05 декабря 2018 года. Vol. 91. Moscow: EDP Sciences, 2019. 02016. DOI:10.1051/e3sconf/20199102016.

12. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Zavadko M., Petropavlovskii K. Gypsum Composition with a Complex Based on Industrial Waste // Chemical Engineering Transactions. 2021. Vol. 88. Pp. 1009–1014. DOI:10.3303/CET2188168.

13. Ержанова А.А., Лесова У.Е., Калшабекова Э.Н. Способы улучшения свойств композиции на основе гипсового вяжущего // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2017. № 3(42). С. 42–45.

14. Alfimova N., Pirieva S., Levickaya K., Kozhukhova N., Elistratkin M. The Production of Gypsum Materials with Recycled Citrogypsum Using Semi-Dry Pressing Technology // Recycling. 2023. Vol. 8. Iss. 2. 34. DOI:10.3390/recycling8020034.

15. Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Дребезгова М.Ю. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. 320 с.

16. Matveeva L.Y., Mokrova M.V., Yastrebinskaya A.V., Edamenko A.S. The effect of latex and nanocarbon modifiers on the properties of high-strength gypsum // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 266–273. DOI:10.1007/978-3-030-54652-6_40.

Информация об авторах

Мокрова Марина Владимировна, старший преподаватель кафедры технологии строительных материалов и метрологии. E-mail: mokrova2017@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Сардарова Селена Анатольевна, студент группы СМб-3кафедры технологии строительных материалов и метрологии. E-mail: sardarovaselena@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 28.09.2023 г.

© Мокрова М.В., Сардарова С.А., 2023

*Mokrova M.V., Sardarova S.A.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: mokrova2017@yandex.ru

INCREASING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GYPSUM COMPOSITE FOR DECORATIVE PRODUCTS

Abstract. The article discusses the results of research on the use of modifying additives in gypsum binder. Regulation of the structure and, therefore, the properties of gypsum stone can be carried out using small quantities of highly active additives that can effectively influence the formation of the structure of gypsum stone, and, consequently, its characteristics. Using functional modifying additives in small quantities, which practically do not affect the cost of the material, and using them to control the composition of gypsum binders, it is possible to obtain effective decorative and finishing gypsum products with improved characteristics.

The work studied the effect of polyvinyl acetate additives together with synthetic polypropylene fiber on the properties of gypsum stone products. A comparison of the physical and mechanical characteristics of modified gypsum composites is presented, and the advantages of introducing fiber are revealed. By covering the pores and capillaries of gypsum stone with fiber fibers, the formation of shrinkage microcracks is significantly reduced, crack resistance increases, and strength characteristics increase.

It has been established that modification of gypsum stone with polyvinyl acetate together with synthetic fibers helps to improve the physical and mechanical characteristics of gypsum stone. The developed compositions of decorative and finishing gypsum tiles using the additions of polyvinyl acetate and polypropylene fiber make it possible to obtain gypsum finishing materials products with improved characteristics, which demonstrates their increased efficiency as a modern finishing material and opens up broad prospects for use in housing and civil construction.

Keywords: gypsum stone, modification, additives, polyvinyl acetate, synthetic fiber.

REFERENCES

1. Kirghizbayev A.T. The effect of carbonate fillers on the properties of anhydrite binder and gypsum stone. Construction technologies. 2023. No. 1(79). Pp. 24–27. DOI:10.55956/NYIA5819.
2. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R. Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder. Smart and Sustainable Built Environment. 2021. Vol. 10, No. 4. Pp. 702–710. DOI 10.1108/SASBE-04-2020-0037.
3. Ivanyuk D.M., Shatalova S.V. Regulation of the properties of foam concrete products based on composite gypsum binder [Regulirovanie svojstv penobetonnyh izdelij na osnove kompozicionnogo gipsovogo vyazhushchego]. II Mezhdunarodnyj onlajn-kongress, posvyashchennyj 30-letiyu kafedry Stroitel'nogo materialovedeniya, izdelij i konstrukcij. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2019. Pp. 561–565. (rus)
4. Chernyshova N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu., Kladiyeva D.M. On the use of gypsum composite materials for green construction. [K voprosu primeneniya gipsovyh kompozicionnyh materialov dlya zelenogo stroitel'stva]. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, chlena-korrespondenta RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk, professora Valeriya Stanislavovicha Lesovika v 3 chastyah. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2016. Pp. 327–332. (rus)
5. Stenin A.A., Lesovik V.S. Composite materials based on natural reinforcing fibers [Kompozicionnye materialy na osnove prirodnyh armiruyushchih volokon]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy onlajn-konferencii. Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova. 2018. Pp. 315–320. (rus)
6. Khalipaeva S.I. K., Mamadzhyanov I.B., Urazova D.D. K. Investigation of the effect of functional additives on the strength of gypsum stone, dispersed-reinforced with synthetic fiber [Issledovanie vliyaniya funktsional'nyh dobavok na prochnost' gipsovogo kamnya, dispersno-armirovannogo sinteticheskimi voloknom]. Problems of modern science and education. 2019. No. 10(143). Pp. 36–38. (rus). DOI:10.24411/2304-2338-2019-11001.
7. Pukharensko Yu.V., Kovaleva A.Yu., Sidorova A.S., Eshanzada S.M. Stabilization of the structure of hardening high-strength concrete with reinforcing fibers [Stabilizatsiya struktury tverdeyushchego vysokoprochnogo betona armiruyushchimi voloknami]. Industrial and civil construction. 2022. No. 5. Pp. 9–13. (rus). DOI:10.33622/0869-7019.2022.05.09-13.
8. Tolibova V.I. Polypropylene fiber – an effective reinforcing additive [Polipropilenovaya fibra – effektivnaya armiruyushchaya dobavka]. Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoj molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Novosibirskij

Centr razvitiya nauchnogo sotrudnichestv. 2017. Pp. 123–126. (rus)

9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukhareno Y.V. Fiber concrete for industrial and civil construction. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 120–124. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.120.

10. Gusev B.V., Grishina A.N., Korolev E.V. Features of the structure formation of gypsum binder modified with zinc hydrosilicates [Osobennosti strukturoobrazovaniya gipsovogo vyazhushchego, modifitsirovannogo gidrosilikatami cinka]. Industrial and civil construction. 2020. No. 2. Pp. 40–46. DOI:10.33622/0869-7019.2020.02.40-46.

11. Grishina A., Korolev E. Structure formation of gypsum binder with zinc hydrosilicates. E3S Web of Conferences. Civil Engineering and Environmental Economics. 2019. 02016. DOI:10.1051/e3sconf/20199102016.

12. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Zavadko M., Petropavlovskii K. Gypsum Composition with a Complex Based on Industrial Waste. Chemical Engineering Transactions.

2021. Vol. 88. Pp. 1009–1014. DOI:10.3303/CET2188168.

13. Yerzhanova A.A., Lesova U.E., Kalshabekova E.N. Ways to improve the properties of a composition based on gypsum binder. Scientific works of M. Auezov SKSU. 2017. No. 3(42). Pp. 42–45.

14. Alifimova N., Pirieva S., Levickaya K., Kozhukhova N., Elistratkin M. The Production of Gypsum Materials with Recycled Citrogypsum Using Semi-Dry Pressing Technology. Recycling. 2023. Vol. 8. Iss. 2. 34. DOI:10.3390/recycling8020034.

15. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Drebezgova M.Yu. Water-resistant gypsum composite materials with the use of technogenic raw materials. [Vodostojkie gipsovye kompozitsionnye materialy s primeneniem tekhnogennogo syr'ya]. Belgorod: BGTU, 2015. 320 p. (rus)

16. Matveeva L.Y., Mokrova M.V., Yastrebin-skaya A.V., Edamenko A.S. The effect of latex and nanocarbon modifiers on the properties of high-strength gypsum. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 266–273. DOI:10.1007/978-3-030-54652-6_40.

Information about the authors

Mokrova, Marina V. Senior Lecturer of the Department of Technology of Building Materials and Metrology. E-mail: mokrova2017@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Sardarova, Selen A. Student of the SM b3 group of the Department of Technology of Building Materials and Metrology. E-mail: sardarovaselen@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Received 28.09.2023

Для цитирования:

Мокрова М.В., Сардарова С.А. Повышение эксплуатационных характеристик гипсового композита для декоративных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 18–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-18-26

For citation:

Mokrova M.V., Sardarova S.A. Increasing the performance characteristics of gypsum composite for decorative products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 18–00. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-18-26

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

Маркина Ю.Д.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: poluektoff@bk.ru

КРУЧЕНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ

Аннотация. Нижний пояс подкраново-подстропильной фермы, по которому перемещается кран, изготавливается из тонкостенного коробчатого профиля. Местные сосредоточенные крановые нагрузки, приложенные к поясу с эксцентриситетом, вызывают его стесненное кручение. Методика расчета подкраново-подстропильной фермы не учитывает включение в работу нижнего пояса на кручение и горизонтальный изгиб элементов решетки. За расчетную схему пояса принимается балка, пролетом равная пролету подкраново-подстропильной фермы. В действительности поведение пояса при кручении отличается от поведения балки.

Целями работы являются оценка влияния на работу нижнего пояса при кручении элементов решетки и верхнего пояса и уточнение методики расчета нижнего пояса. Проведено исследование влияния элементов решетки на угловую податливость и крутящий момент нижнего пояса при различных соотношениях жесткостей пояса и всей подкраново-подстропильной фермы. Предложена расчетная схема пояса для расчета на кручение – балка на угловых упругих опорах в точках примыкания решетки. Принята формула для определения жесткости упругих опор. Погрешность в определении изгибающих моментов в нижнем поясе по предложенному методу относительно результатов численного расчета стержневой расчетной схемы всей подкраново-подстропильной фермы не превышает 2 %. Аналитически определены напряжения в нижнем поясе с учетом составляющей от кручения. Полученные результаты проверены численным методом с применением оболочечных конечных элементов и натурным обследованием.

Ключевые слова: кручение, угол поворота, угловая податливость, тонкостенное сечение, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Подкраново-подстропильные фермы (ППФ) – это конструкции, совмещающие в себе функции подкрановых систем, то есть систем, поддерживающих крановые пути и обеспечивающих возможность перемещения по ним мостовых кранов, и функции подстропильных систем, поддерживающих стропильные фермы и конструкции покрытия. Продольные ППФ, используемые при перемещении мостовых кранов вдоль здания, широко распространены в промышленных зданиях металлургических предприятий. Пролеты таких конструкций могут достигать 48 м, грузоподъемность крана составляет 400 т и более, режимы работы кранов на металлургических предприятиях – 7К, 8К. Элементы ППФ изготавливаются из габаритных сварных двутавровых балок и замкнутых коробчатых профилей, обладающих значительной жесткостью, как в плоскости, так и из плоскости ППФ.

Пространственная работа ППФ обеспечивается в первую очередь мощным ездовым поясом замкнутого сечения, который способен равноценно работать на изгиб в двух плоскостях и сопротивляться деформациям закручивания. Пояс изготавливается из тонкостенного коробчатого профиля, часто несимметричного, с консолями, диафрагмами, ребрами жесткости и другими подкрепляющими элементами. Высота и ширина сечения могут превышать 3 м [1]. Аналитический расчет пояса, по которому перемещается кран,

осложняется тем, что приложенные к поясу с эксцентриситетом местные сосредоточенные крановые нагрузки, вызывают его стесненное кручение. Тонкостенные балки замкнутого профиля при кручении находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС), в них возникают дополнительные нормальные напряжения и деформации [2]. Классическая теория расчета на кручение тонкостенных балок с замкнутым профилем была разработана А.А. Уманским [3]. Исследования НДС тонкостенных балок замкнутого профиля и различные методы анализа предложены в работах [4–8]. В статьях [9, 10] анализируется влияние сдвиговых деформаций на поведение замкнутого профиля при кручении.

При расчете на кручение и горизонтальный изгиб по действующей методике [11] нижний пояс считается нераскрепленным из плоскости ППФ. Усилия в нем от горизонтальных нагрузок и кручения определяются как для однопролетной балки, пролетом равной пролету ППФ. В действительности механизм кручения пояса ППФ отличается от балочного. Горизонтальные линейные смещения и угловые смещения пояса вовлекают в работу элементы решетки. Элементы решетки испытывают изгиб из плоскости ППФ и кручение, при этом оказывают поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшают его смещение, усилия и напряжения [12]. При горизонталь-

ном изгибе перемещения нижнего пояса ППФ отличаются от перемещений балки пролетом и сечением эквивалентной нижнему в пределах 12 % [13]. При приложении к нижнему поясу крутящего момента угол поворота ездового пояса в сравнении с эквивалентной балкой может не только снижаться, но и, чаще, значительно возрастать [14].

Целями данной работы является оценка влияния конструктивных элементов ППФ на работу нижнего пояса при кручении, и уточнение методики его расчета с учетом вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1) Исследование работы нижнего пояса при кручении, выявление отличий его работы от работы балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу. Такая балка является расчетной схемой для определения внутренних усилий в нижнем поясе по действующей методике расчета [11].

2) Разработка аналитического метода учета вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение, уточнение методики расчета нижнего пояса ППФ.

3) Численное исследование НДС ППФ, сравнение напряжений, полученных аналитическими вычислениями и численным методом конечных элементов.

4) Сравнение результатов исследования с результатами натурного обследования.

Методика проведения исследований. В качестве объекта исследования выбрана ППФ конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Тип конструкции – продольная ППФ, пролет – 36 м, высота – 15,44 м (рис. 1). Раскосы и стойки решетки ферм составного двутаврового сечения. Нижний пояс – неразрезная сварная балка несимметричного коробчатого сечения. Узлы сопряжения решетки с прорезными фасонками нижнего пояса выполнены на высокопрочном крепеже.

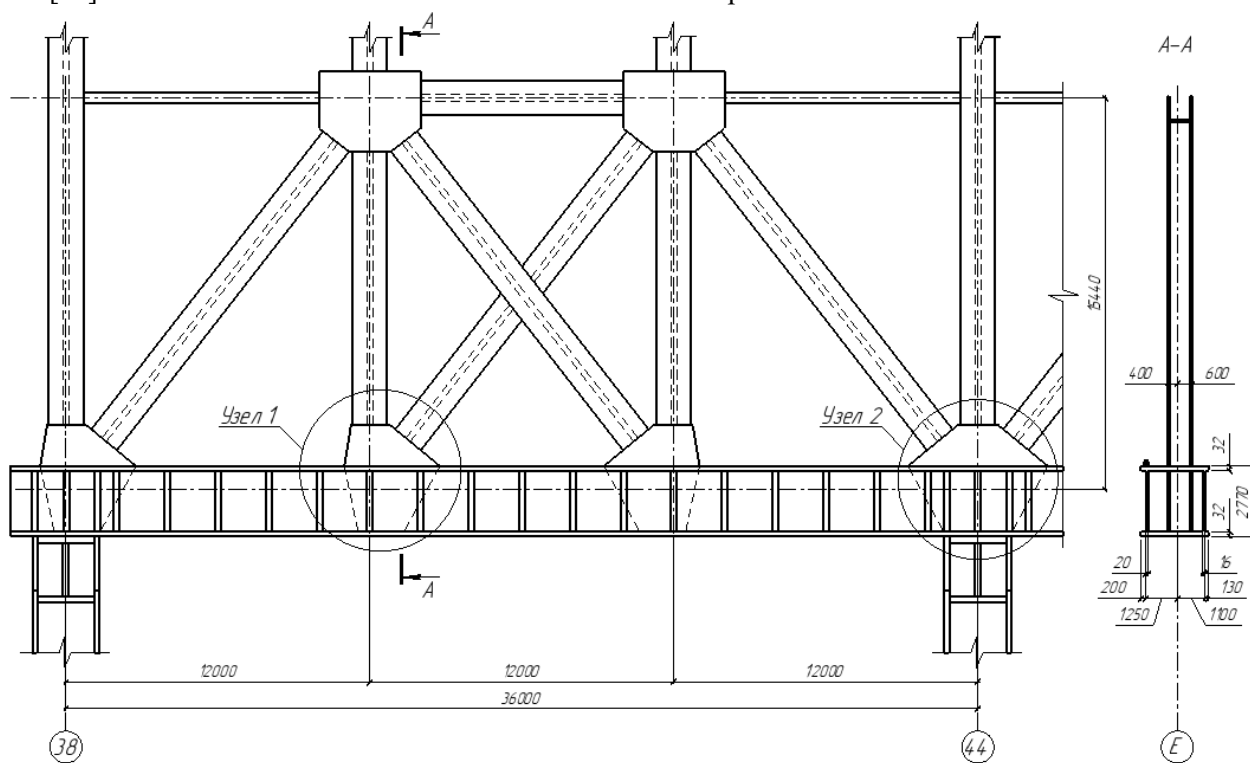


Рис. 1. ППФ конвертерного отделения ККЦ ММК

Для изучения работы нижнего пояса при кручении, выявления отличий его работы от работы балки, оценки влияния на работу пояса соотношения жесткостей нижнего пояса и всей ППФ рассмотрены 5 вариантов исследуемой ППФ с различными сечениями элементов решетки. Для каждой расчетной схемы (РС) определялись угловая податливость и максимальный крутящий момент в нижнем поясе от нагружения

крутящим моментом $M_{кр} = 100$ кНм, приложенным в узел сопряжения элементов решетки с нижним поясом (узел 1, рис. 1). Проведено сравнение этих параметров с результатами расчета балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу. Расчеты выполнены численным методом конечных элементов с применением стержневых элементов.

Предложен аналитический метод расчета нижнего пояса на кручение. Проведено сравнение результатов расчета податливости и максимального крутящего момента нижнего пояса при аналитическом и численном расчете для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ.

Для проверки правильности определения напряжений по аналитической методике построена пространственная модель ППФ с применением оболочечных конечных элементов, позволяющих учесть упругую податливость в соединениях, влияние подкрепляющих элементов и конструктивного решения соединения на работу

конструкции (рис. 2). Приняты 4-узловые оболочечные конечные элементы с 6 степенями свободы в каждом узле – тип 44. Размеры конечных элементов нижнего пояса не превышают 0,2 м [15, 16]. В основном используются четырехугольные элементы с соотношением сторон, близким к единице. Граничные условия заданы из условия опирания на верхний пояс ППФ стропильных ферм и жесткого закрепления оснований колонн. В узлах опирания стропильных ферм на верхний пояс установлены связи, препятствующие смещению в направлении оси Y , в нижних узлах колонны установлены связи, препятствующие смещению и повороту во всех направлениях.

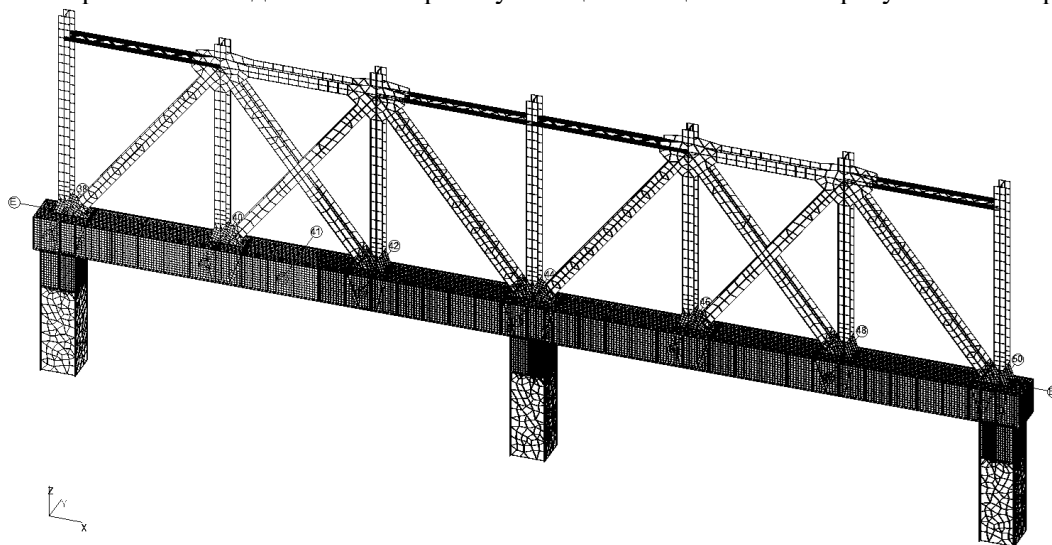


Рис. 2. Конечно-элементная модель ППФ

Все численные расчеты выполнены с помощью ПК SCAD.

Для сопоставления результатов аналитического и численного расчета с результатами натурного обследования произведен расчет на нагрузку от одного крана, расположенного в середине пролета ППФ в осях 38–44. Вес груза $Q = 396$ т. Приближение грузовой тележки определено из условия максимально возможного – 3,2 м.

Исследования напряженно-деформированного состояния узлов примыкания к нижнему поясу элементов решетки и опорных узлов ППФ проводились тензометрическим методом в рамках натурного обследования. Основные результаты обследования приведены в монографии [17]. Объекты – ППФ, расположенные в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ККЦ ММК) в прокатном цехе № 3 ОАО «Златоусовский металлургический комбинат». ККЦ ММК построен в 1989 г. и состоит из двух основных производственных помещений: конвертерного отделения и отделения непрерывной разливки стали (ОНРС). Основной каркас ККЦ смонтирован по

чертежам шифра 3-Ф1535.02 км1 ЦНИИПроктстальконструкции. Металлоконструкции каркаса изготовлены на Челябинском заводе металлоконструкций и смонтированы трестом «Уралстальконструкция».

Конвертерное отделение состоит из трех пролетов. ППФ установлены по ряду «Е» (рис. 1). В качестве стропильных конструкций используются стропильные балки. Кровля холодная из профильного металлического листа. В конвертерном отделении грузоподъемность мостового крана $Q=450/100/20$ т, вес крана 615 т, режим работы 7К.

Проведено изучение кинетики напряженно-деформированного состояния от крановой нагрузки тензометрическим методом. Измерения проводились проволоочными тензорезисторами с базой 5 мм, которые объединялись в трехкомпонентные прямоугольные тензорозетки, что позволило определить напряжения по основным направлениям. Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3 в автоматическом режиме опроса и выдачи информации.

В конвертерном отделении исследования проводились в узле, расположенном по ряду «Е», ось «44». При испытании узла ППФ загрузка была осуществлена одним краном, расположенным в пролёте «Д-Е». Вес груза $Q = 396$ т. Приближение грузовой тележки составило 3,2 м (максимально возможное). При каждом положении тележки производился трёхкратный опрос тензорезисторов.

При проведении всех испытаний снятие нулевых отчётов производилось при нахождении крана за температурным швом. Регистрацию показаний осуществляли после фиксирования положения крана в заданной точке и выдерживания нагрузки в течение 5–10 минут.

Основная часть. Поведение пояса ППФ при кручении отличается от поведения балки. При

кручении балки происходит поворот её сечений без смещения относительно нейтральной оси. При кручении пояса происходит поворот и горизонтальное смещение его сечения относительно нейтральной оси, сопровождаемое дополнительным поворотом. Поэтому податливость нижнего пояса может превышать податливость эквивалентной балки, при этом крутящий момент в поясе всегда будет меньше. На рисунке 3, 4 приведены результаты численного расчета угловой податливости и максимального крутящего момента нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса. При расчете стержневой РС всей ППФ значения крутящих моментов в нижнем поясе более, чем в 2 раза ниже, чем при расчете по РС балки, пролетом равной пролету ППФ.

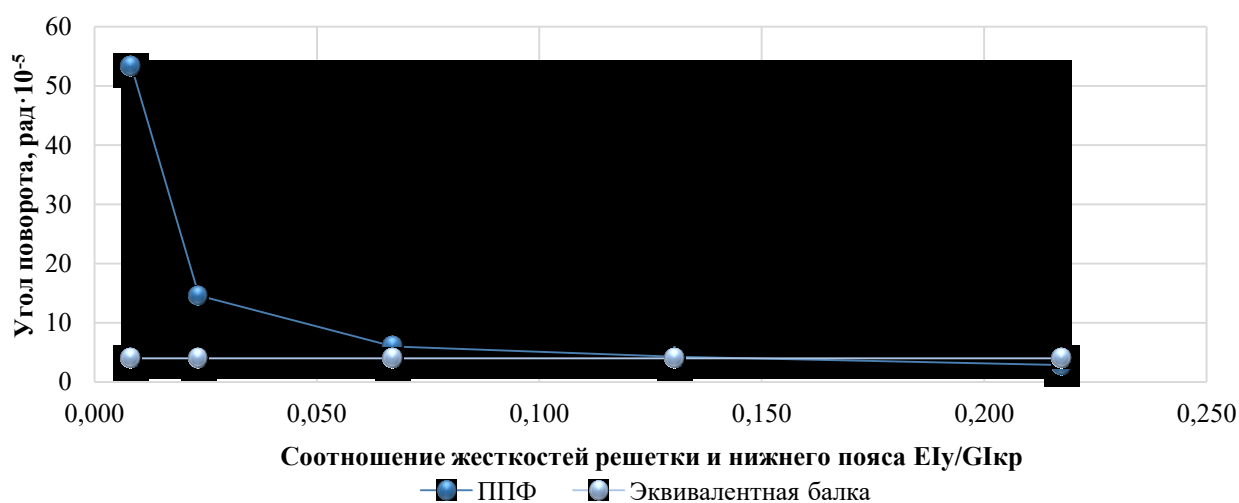


Рис. 3. Угловая податливость нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

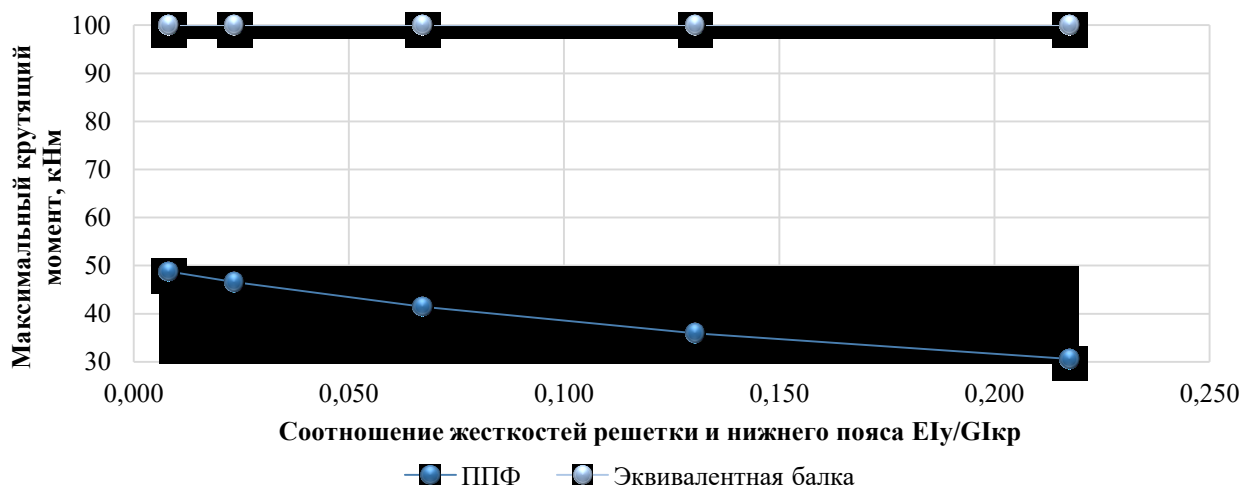


Рис. 4. Максимальный крутящий момент нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

С целью приближения РС нижнего пояса к реальной конструкции необходимо учитывать включение решетки в работу ППФ на кручение. Для этого принимаем в качестве РС пояса балку

с угловыми упругими опорами в местах присоединения решетки, оказывающими сопротивление повороту вокруг продольной оси (рис. 5).

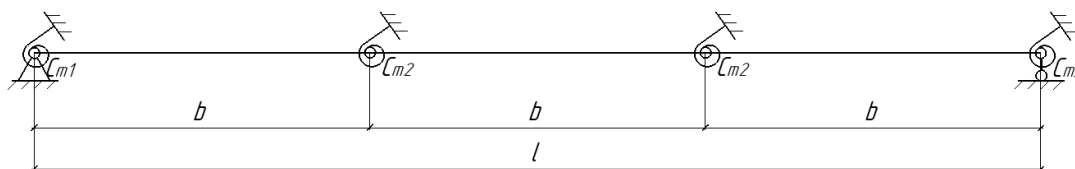


Рис. 5. РС нижнего пояса – балка на угловых упругих опорах
 l – пролет ППФ, b – длина панели

В ППФ, верхние пояса которых соединены со стропильными фермами и связями, в противодействии смещений которых участвуют и элементы кровли, соответствующие концы решетки работают как зашкеленные. Тогда жесткость упругих опор, эмитирующих решетку, можно определить по формуле:

$$C_{mi} = \frac{4EI_{np,yi}}{h}, \quad (1)$$

где h – высота ППФ по осям пояса;

$I_{np,yi}$ – приведенный момент инерции элементов решетки, определяемый как сумма проекций моментов инерции всех элементов решетки, сходящихся в i -ом узле, на вертикальную ось:

$$I_{np,yi} = \sum_{j=1}^{k_i} I_{yj} \sin^2 \alpha_j, \quad (2)$$

α_j – угол наклона j -ого элемента решетки к вертикальной оси.

Для вычисления матрицы удельных перемещений уравнений пяти бимоментов B_i используются относительные жесткости упругих опор:

$$\overline{C}_{mi} = \frac{C_{mi}}{EI_{\omega}}, \quad (3)$$

I_{ω} – секториальный момент инерции сечения нижнего пояса.

Сравнение результатов расчета податливости и крутящего момента нижнего пояса при аналитическом и численном расчете для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ приведено на рисунке 6. Особенность деформации нижнего пояса при учете решетки заключается в том, что, когда при кручении он испытывает горизонтальный изгиб, его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, и с различными углами закручивания. Несмотря на большую погрешность в определении податливости (10–26 %), результаты определения крутящего момента сходятся (погрешность 0,3–1,9 %).

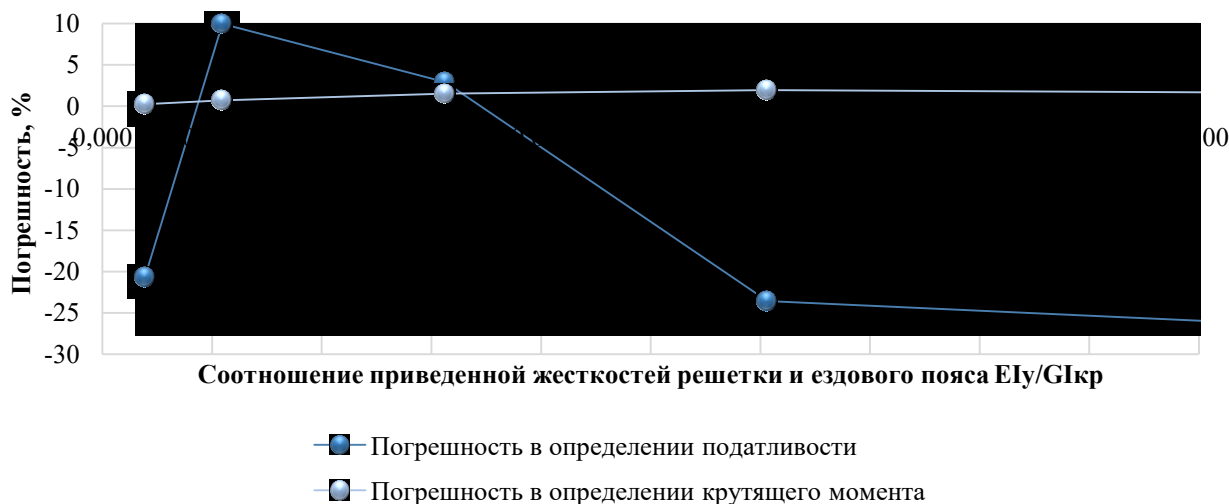


Рис. 6. Точность аналитического расчёта нижнего пояса

При несимметричной вертикальной нагрузке от крана схема работы системы была разложена на изгиб в вертикальной плоскости и

кручение пояса, сопровождаемое изгибом и кручением решетки.

Эквивалентное напряжение вычислены в соответствии с СП 16.13330.2017 по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{loc,x})^2 - (\sigma_x + \sigma_{loc,x})\sigma_{loc,y} + \sigma_{loc,y}^2 + 3(\tau_{xy} + \tau_{loc,xy})^2}. \quad (4)$$

Входящие в (4) выражения элементарных напряжений определены с учетом всех составляющих:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \sigma_{xz} + \sigma_{xy} + \frac{B_{\omega}\omega}{I_{\omega}}, \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\Delta K_3(0)S_{\phi 1}}{s_1 I_{zu}}, \quad (6)$$

где σ_{xz} и σ_{xy} – изгибные напряжения, определяемые для кромки стенки;

$\Delta K_3(0)$ – полусумма равнодействующих касательных напряжений в стенке под силой.

Результаты вычисления эквивалентных и касательных напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–44 приведены на рисунке 7.

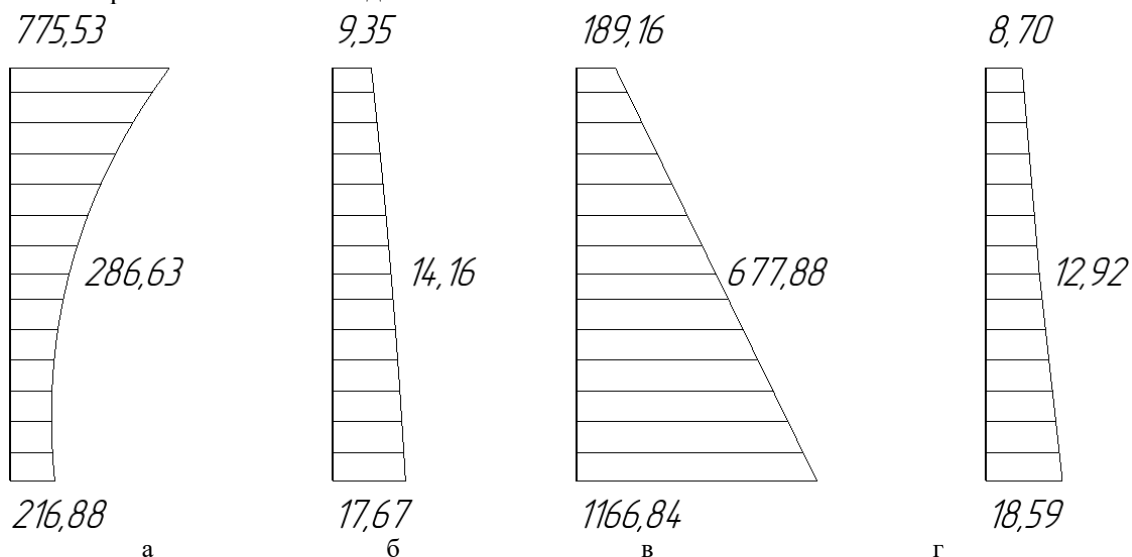


Рис. 7. Поля напряжений в стенках нижнего пояса в середине пролета, кг/см²:

а) σ_e в стенке под крановым рельсом, б) τ_{xy} в стенке под крановым рельсом, в) σ_e в правой стенке, г) τ_{xy} в правой стенке (по рис. 1)

Результаты аналитического расчета в отдельных зонах имеют расхождение с результатами расчета на ЭВМ. Сравнение напряжений,

полученных аналитическим и численным методами приведено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение значений напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–44

Элемент	Точка	Аналитический расчет		Численный расчет	
		σ_e , кгс/см²	τ_{xy} , кгс/см²	σ_e , кгс/см²	τ_{xy} , кгс/см²
Левая стенка (рис. 1)	Верх	775,53	9,35	714,09	2,10
	Центр	286,63	14,16	270,64	13,64
	Низ	216,88	17,67	478,72	17,60
Правая стенка (рис. 1)	Верх	189,16	8,70	298,15	17,90
	Центр	677,88	12,92	425,94	21,22
	Низ	1166,84	18,59	799,44	19,26

Сравнение результатов численного расчета и натурного обследования исследуемой ППФ приведено в таблице 2. Данные экспериментальных исследований НДС узла ППФ, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результа-

тами численного расчета методом конечных элементов за исключением отдельных точек. Несответствие отдельных напряжений может объясняться влиянием сварочных напряжений и скоплением трещиноподобных дефектов в околошовных зонах [18].

Таблица 2

Сравнение значений напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)

Точка на рис. 9	Натурное обследование			Численный расчет		
	σ_x , кгс/см²	σ_y , кгс/см²	τ_{xy} , кгс/см²	σ_x , кгс/см²	σ_y , кгс/см²	τ_{xy} , кгс/см²
1	-147	441	218	-21,7	391,8	126,2
2	-168	-840	-396	-157,6	-510,4	-277,0
3	966	672	-32	160,8	620,71	357,48
4	714	945	97	705,9	101,3	94,0

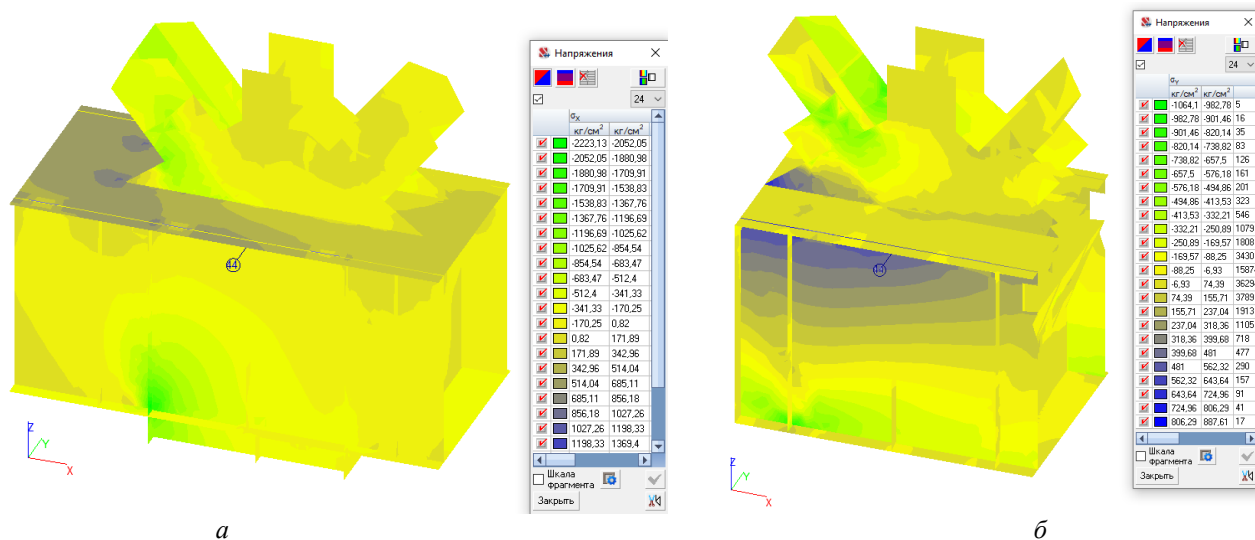


Рис. 8. Поля напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)

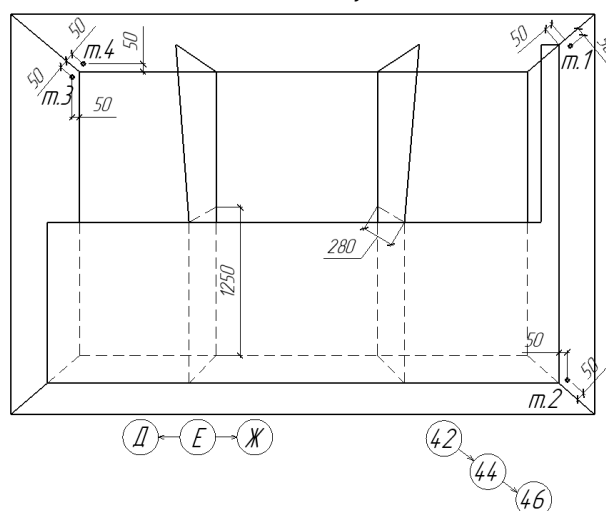
а) σ_x , б) σ_y 

Рис. 9. Схема привязки точек определения напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)

Выводы.

1. Расчетная схема балки, принятая в действующей методике расчета нижнего пояса ППФ, не учитывает вовлечение элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение. Крутящие моменты в эквивалентной балке более, чем в 2 раза выше крутящих моментов в нижнем поясе ППФ. При увеличении соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса $EI_y/GI_{кр}$ крутящий момент в нижнем поясе уменьшается.

2. Угловая податливость ездового пояса в большой степени зависит от соотношения жесткостей. Учет в расчете решетки может не только уменьшить, но и увеличить угол поворота пояса в зависимости от соотношения жесткостей. При соотношении изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса $EI_y/GI_{кр} < 0,07$ решетка оказывает значительное отрицательное влияние на угловую податливость ездового пояса кручению.

Податливость нижнего пояса может превышать податливость эквивалентной балки, так как при кручении происходит поворот сечений балки без смещения относительно нейтральной оси, при кручении пояса происходит поворот и горизонтальное смещение сечения, сопровождаемое дополнительным поворотом.

3. Расчетная схема балки на угловых упругих опорах, оказывающих сопротивление повороту вокруг продольной оси, позволяет учесть включение решетки в работу пояса на кручение и в большей степени соответствует работе реальной конструкции. Жесткость опор, устанавливаемых в местах присоединения элементов решетки к нижнему поясу, определена с учетом защемления верхних концов элементов решетки по формуле (1).

При определении крутящего момента погрешность предложенного аналитического метода относительно численного составляет не более 2 %. Большая погрешность при определении

податливости (10–26 %) объясняется особенностью деформации нижнего пояса, заключающейся в том, что при кручении его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, и с различными углами закручивания.

4. Результаты аналитического расчета напряжения в нижнем поясе с учетом составляющей от кручения имеют расхождение с результатами расчета пространственной модели ППФ на ЭВМ в некоторых зонах. Необходимо дополнительное изучение методов вычисления внутренних усилий и напряжений в нижнем поясе. Данные натурных исследований напряжений пояса, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результатами численного расчета за исключением отдельных точек. Причинами несоответствия напряжений в отдельных зонах могут являться скопления трещиноподобных дефектов в околошовных зонах и сварочные напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ельников Н.А., Кочетова Е.А. Анализ применения систем типа «подкраново-подстропильные фермы» в большепролетных цехах одноэтажных промышленных зданий // Труды научного конгресса 14-го российского архитектурно-строительного форума. 2016. С. 143–146.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М: Физматгиз, 1959. 568 с.
3. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.: Оборонгиз, 1939. 112 с.
4. Doostfateme A., Hematiyan M., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges // Journal of Mechanics. 2009. Vol. 25. No. 4. Pp. 401–409.
5. Srinivasan V., Purushothaman T., Chatterjee S. Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. № 8. Pp. 1580–1587.
6. Omidvari A., Hematiyan M. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion // International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. No. 8. Pp. 1226–1232.
7. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross-sections exhibiting no warping // Journal of Applied Mechanics. 2000. Vol. 67. Pp. 460–464.
8. Li L-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open and closed-sections // Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 35. № 1. Pp. 25–32.
9. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain // Thin-Walled Structures. 1987. Vol. 5. № 4. Pp. 277–305.
10. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams // Thin-Walled Structures. 1990. Vol. 10. № 3. Pp. 175–193.
11. Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций. М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1976. 112 с.
12. Лампси Б.Б. Расчет подкраново-подстропильных ферм. Горький, 1978. 52 с.
13. Лампси Б.Б., Хазов П.А., Маркина Ю.Д., Бриккель Д.М. Влияние жесткости элементов решетки на податливость ездового пояса подкраново-подстропильной фермы (ППФ) // Приволжский научный журнал. 2022. № 2. С. 29–37.
14. Лампси Б.Б., Маркина Ю.Д., Хазов П.А. Влияние высоты подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на податливость ездового пояса // Приволжский научный журнал. 2023. № 1. С. 28–34.
15. Tusnina O.A. Finite element analysis of crane secondary truss // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 1(77). Pp. 68–89. DOI:10.18720/MCE.77.7.
16. Туснина О.А., Такки В.Ф., Егоров И.Ф. Опыт замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой подкраново-подстропильной фермы // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 21–28. DOI:10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.
17. Еремин К.И. Предотвращение разрушений строительных металлических конструкций. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 235 с.
18. Еремин К.И., Шульга С.Н. Моделирование развития усталостных повреждений в подкраново-подстропильных фермах // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 30–38.

Информация об авторах

Маркина Юлия Дмитриевна, старший преподаватель, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики. E-mail: poluektoff@bk.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Поступила 26.09.2023 г.

© Маркина Ю.Д., 2023

Markina Yu.D.*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering**E-mail: poluektoff@bk.ru***TORSION OF LOWER BELT OF CRANE SECONDARY TRUSS**

Abstract. *The lower belt of the crane secondary truss, along which the crane moves, is made of a thin-walled box profile. The largest local concentrated crane forces applied with eccentricity to the lower belt of truss made of thin-walled welded box cause its restrained torsion. The calculation method of the crane secondary truss does not consider the inclusion in the work of the lower belt for torsion and horizontal bending of the webs. A beam with a span equal to the span of the crane secondary truss is taken as the design scheme of the lower belt along which the crane moves. In fact, the work of the belt during torsion is different from the work of the beam.*

The objectives of the work are to assess the impact on the operation of the lower belt during torsion of the webs and the upper belt and to clarify the methodology for calculating the lower belt. The study of the influence of webs on the angular malleability and torque of the lower belt has been carried out. Various ratios of the stiffness of the belt and the entire crane secondary truss are considered. The design scheme of the belt for the calculation of torsion is proposed – a beam angular elastic supports at the points of junction of the webs. The formula for determining the stiffness of elastic supports has been adopted. The error in determining the bending moments in the lower belt according to the proposed method relative to the results of numerical calculation of the rod design scheme of the entire crane secondary truss does not exceed 2%. The stresses in the lower belt, considering the torsion component, are analytically determined. The results were verified numerically using shell finite elements and a full-scale examination.

Keywords: *torsion, angle of rotation, angular compliance, thin-walled section, stress-strain state.*

REFERENCES

1. Yelnov N.A., Kochetova Ye.A. Analiz primeneniya sistem tipa «podkranovo-podstropilnye fermy» v bolsheproletnykh tsekhakh odnoetazhnykh promyshlennykh zdaniy [Analysis of the application of systems such as "crane-under-trusses" in large-span shops of single-storey industrial buildings]. Trudy nauchnogo kongressa 14-go rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma. 2016. Pp. 143–146. (rus)
2. Rukovodstvo po proektirovaniyu stalnykh podkranovykh konstruktsiy [Guidelines for the design of steel crane structures]. Moscow.: TsNIIproektstalkonstruktsiya, 1976. 112 p. (rus)
3. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni [Thin-walled elastic rods]. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 568 p. (rus)
4. Doostfatemeh A., Hematiyan M., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges. Journal of Mechanics. 2009. Vol. 25. No. 4. Pp. 401–409.
5. Srinivasan V., Purushothaman T., Samrat Chatterjee Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. No. 8. Pp. 1580–1587.
6. Omidvari A., Hematiyan M. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion. International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. No. 8. Pp. 1226–1232.
7. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross-sections exhibiting no warping. Journal of Applied Mechanics. 2000. Vol. 67. Pp. 460–464.
8. Li L.-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open and closed-sections. Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 35. No. 1. Pp. 25–32.
9. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain. Thin-Walled Structures. 1987. Vol. 5. No. 4. Pp. 277–305.
10. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams. Thin-Walled Structures. 1990. Vol. 10. No. 3. Pp. 175–193.
11. Rukovodstvo po proektirovaniyu stalnykh podkranovykh konstruktsiy [Guidelines for the design of steel crane structures]. Moscow.: TsNIIproektstalkonstruktsiya, 1976. 112 p. (rus)
12. Lamps B.B. Raschet podkranovo-podstropilnykh ferm [Calculation of crane secondary truss]. Gorky, 1978. 52 p. (rus)
13. Lamps B.B., Khazov P.A., Markina Yu.D., Brikkel D.M. Vliyaniye zhyostkosti elementov reshyotki na podatlivost ezdogovogo poyasa podkranovo-podstropilnoy fermy (PPF) [The effect of the rigidity of the grid elements on the pliability of the crane secondary truss riding belt]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. 2022. No. 2. Pp. 29–37. (rus)
14. Lamps B. B., Khazov P. A., Markina Yu. D. Vliyaniye vysoty podkranovo-podstropilnoy fermy (PPF) na podatlivost ezdogovogo poyasa [The effect of the height of the crane secondary truss on the pliability of the riding belt]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. 2023. No. 1. Pp. 28–34. (rus)

15. Tusnina O.A. Finite element analysis of crane secondary truss. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). Pp. 68–89. DOI: 10.18720/MCE.77.7.

16. Tusnina O.A., Tusnina O.A., Takki V.F., Egorov I.F. Opyt zameny nizhnego poyasa nakhodyashcheysya pod nagruzkoy podkranovo-podstropil'noy fermy [Experience of replacing the lower belt of a crane-sub-truss under load]. Industrial and Civil Engineering. 2023. No. 4. Pp. 21–28. DOI:10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.

17. Eremin K.I. Predotvrashcheniye razrusheniy stroitel'nykh metallicheskh konstruktsey [Prevention of destruction of building metal structures]. Magnitogorsk, 2004. 235 p. (rus)

18. Eremin K.I., Shulga S.N. Modelirovaniye razvitiya ustalostnykh povrezhdeniy v podkranovo-podstropil'nykh fermakh [Simulation of fatigue damages in crane secondary truss]. Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering. 2014. No. 2. Pp. 30–38. (rus)

Information about the authors

Markina, Yuliya D. Senior lecturer, postgraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics. E-mail: poluektoff@bk.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Il'inskaya str., 65.

Received 26.09.2023

Для цитирования:

Маркина Ю.Д. Кручение нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

For citation:

Markina Yu.D. Torsion of lower belt of crane secondary truss. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45

***Юрьев А.Г., Зинькова В.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: yuriev_ag@mail.ru

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ КОСОГО ИЗГИБА

Аннотация. Строительное искусство состоит в единстве функции конструкции и ее формы, воплощенной в материале. Несущая способность материала всецело зависит от выбранной формы. Это выражается в рациональном соотношении нагрузки и опоры. На уровне определения топологии конструкции в качестве аналогии рассматривается процесс «обволакивания» материей силового поля в природных системах. Это явление соотносится с техническим обеспечением косоугольного изгиба, характерного, в частности, для прогона покрытия сооружения. Рациональный в условиях прямого изгиба швеллер при косоугольном изгибе утрачивает свою эффективность. Лучшие показатели оказываются у Z-ового профиля с вертикальной стенкой. Ориентация его полок соответствует принципу насыщения материалом областей, примыкающих к внешнему силовому полю. Но и этот профиль не в полной мере удовлетворяет наиболее эффективному противостоянию косоугольному изгибу. Введение наклонной стенки позволяет приблизить материал полки к внешнему силовому полю. Сопоставление функционирования упомянутых профилей дано на числовых примерах, объединенных назначенной площадью сечения бруса. Для Z-ового профиля с наклонной стенкой выведены формулы геометрических характеристик. Угол наклона стенки определяется из условия трансформирования косоугольного изгиба в прямой изгиб, то есть совпадения следа силовой плоскости с главной осью сечения бруса. В рамках приведенных исследований можно говорить о снижении напряжений примерно на 80 %. Рассмотрен также косоугольный изгиб при нелинейном физическом законе.

Ключевые слова: форма сечения бруса, несущая способность материала конструкции, косоугольный изгиб, Z-овый профиль с наклонной стенкой, диаграмма Прандтля.

Введение. Строительное искусство состоит в единстве функции конструкции и ее формы, воплощенной в материале. Несущая способность материала всецело зависит от выбранной формы. Это выражается в рациональном соотношении нагрузки и опоры [1–5]. Когда строительный материал определен, несущая способность конструкции является функцией ее топологии, геометрии и параметров элементов [6–10]. Этот принцип проектирования известен итальянский зодчий П. Нерви назвал «сопротивляемостью по форме».

Во второй половине XIX века инженер К. Кульман и анатом Г.Х. фон Мейер совместно проводили серьезные исследования влияния механики окружающей среды на трабекулярные структуры. Они положили начало биомеханике несущих конструкций. На результаты их сотрудничества обратил внимание профессор В. Ру, впервые использовавший термин «функциональная адаптация» [11].

Тектоника биологических систем выглядит значительно сложнее, так как «конструкции» включаются в организм, выполняющий качественно иные функции. Форма возникает здесь в результате наложения различных подсистем. Тем не менее, закон «борьбы элементов» в организме [11] устанавливает конструктивное сочетание – максимум работы при минимуме материала. Функциональное раздражение создает укрепле-

ние нагруженного органа путем возрастания поставки вещества. Отсутствие раздражения дает возможность доставить вещество в другие органы, где, напротив, наблюдается повышение раздражения. Так представляется «обволакивание» материей силового поля, создающее возможность органическим системам приспособиться к воздействию внешних факторов.

Долгие по времени и многократные по частоте внешние воздействия умеренной интенсивности вызывают как функциональную, так и морфологическую перестройку затронутых структур. В то же время рациональная экономичность организмов при снижении уровня внешних воздействий ведет к снижению функциональных возможностей и прочностных показателей в первую очередь опорно-двигательного аппарата.

Конструкционная бионика представляет природные системы в виде объемных моделей. В этом заключается не только средство установления законов структурообразования организмов, но и способ решения насущных практических задач.

Идеи конструкционной бионики могут способствовать совершенствованию теории структурного синтеза, исходящей из принципа стационарного действия. «Обволакивание» материей силового поля можно толковать как противостояние внешним воздействиям со стороны поля внутренних сил в материале, отождествляемых с

потенциальной энергией деформации. Сосредоточение материала диктуется «вызовом» внешнего силового поля.

Рассмотренное противостояние нагрузки и конструкции можно рассматривать в рамках принципа «сопротивляемости по форме». Остановимся на общем случае изгиба бруса (косом изгибе) [12–14]. Помимо линейно-упругого деформирования, рассмотрим случай физической нелинейности.

Методика исследования. Вариационное исчисление – универсальный аппарат для творчества в механике. Вариационные принципы представляют собой ее теоретическую основу с энергетическим содержанием, устанавливают рациональные подходы к решению задач. В то же время они имеют большое практическое значение. При сформировавшихся функционалах можно вывести дифференциальные уравнения и естественные граничные условия при таких обстоятельствах, когда непосредственный подход затруднителен. Кроме того, прямые методы дают возможность решить задачу на вариационной основе, не прибегая к дифференциальным уравнениям.

Эти свойства присущи и вариационным принципам синтеза конструкций, сформированным на распространении функционального пространства на конфигурацию и модули упругости материала. При этом потенциальная энергия системы, находящейся в устойчивом равновесии, имеет абсолютный минимум по перемещениям, а функционал в точке стационарности – минимакс, а именно минимум по функциям перемещений максимумов по функциям конфигурации и (или) модулей упругости [15–18].

В работе [15] это демонстрируется на примере проектирования консоли с поперечным сечением в форме двутавра, нагруженной моментом в главной плоскости, при дополнительном условии ограничения прогиба.

Дополнительные условия (в форме уравнений связи) накладываются на переменные функционала вариационной задачи, в которой определяется ее условный экстремум. Следствием стационарности функционала являются уравнения, присущие базовому функционалу (Лагранжа или Кастильяно), уравнения связи, специфические уравнения структурообразования. Последние обуславливают надлежащий в традиционном проектировании критерий оптимальности. Важно заметить, что он приобретает здесь объективный характер, в то время, как в других случаях, кроме оговоренных в теореме Васютинского [19], эта существенная установка не лишена субъективности.

В упомянутом примере использовано свойство двойственности реализации задач на условный экстремум. Вместо исследования функционала с энергетическим содержанием рассматривается минимизация площади поперечного сечения.

В общем случае изгиба бруса такая постановка задачи усложняется в связи с двучленностью формулы напряжений и необходимостью итерационной процедуры расчета. Более простое решение вытекает с позиций «обволакивания» материей силового поля.

В качестве целевой функции избираем экстремальные напряжения в сечении бруса, входящие в условия прочности. Для упрощения постановки задачи останавливаемся на чистом изгибе, вызывающем исключительно нормальные напряжения.

Включенные в поле зрения профили рассматриваются в последовательности их появления в рамках технического прогресса. Для оценки их эффективности сохраняется внешнее силовое поле и объем используемого материала, что выражается в одинаковой площади поперечного сечения бруса. В каждом случае вызывает интерес возможность трансформации косоугольного изгиба в прямой изгиб, что упрощает деформационное состояние элемента конструкции.

Основная часть. Под косым изгибом подразумевается общий случай изгиба, при котором плоскость действия момента не содержит главную ось инерции сечения. Он характерен, в частности, для прогона покрытия сооружения (рис. 1). Здесь $f-f$ – след силовой плоскости, z, y – главные центральные оси инерции сечения бруса.

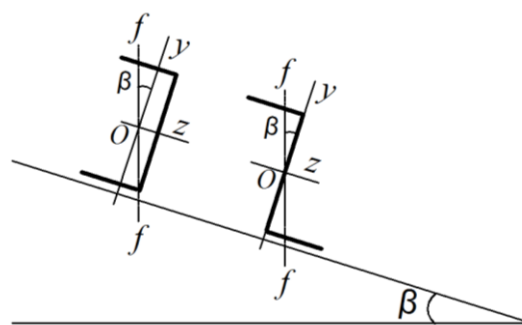


Рис. 1. Профили в качестве прогонов покрытия

В продолжении исследований рациональной формы сечений бруса при косом изгибе [20] остановим внимание на профилях, показанных на рисунке 1. Заметим, что в отдельных случаях они могут состоять из перфорированных элементов с поперечными связями [21].

Первый тип профиля представлен на рисунке 2. В численном примере приняты размеры: $b=11,2$ см; $t=2,5$ см; $h=20$ см; $t_1=3,3$ см. Площадь

сечения составляет 122 см^2 , моменты инерции имеют величины: $I_z=6517 \text{ см}^4$, $I_y=2224 \text{ см}^4$. Центр тяжести O находится на расстоянии 4,98 см от наружной грани стенки.

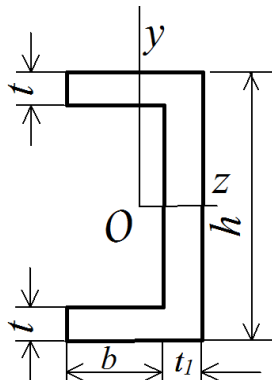


Рис. 2. Профиль типа швеллер

Представив, как обычно, косой изгиб бруса моментом M как одновременный изгиб бруса моментами $M_z=M\cos\beta$ и $M_y=M\sin\beta$, вычислим модуль экстремального напряжения при $\beta=30^\circ$:

$$\sigma = M \left(\frac{0,866}{6517} 10 + \frac{0,5}{2224} 9,52 \right) = 0,0034M.$$

Силовая плоскость проходит через II и IV квадранты системы координат zOy . И если во II квадранте расположена большая часть верхней полки длиной 9,52 см, то в IV квадранте – лишь небольшая часть нижней полки длиной 1,68 см. Это обстоятельство приводит к развороту нижней полки вправо и переходу к Z-овому профилю (рис. 3).

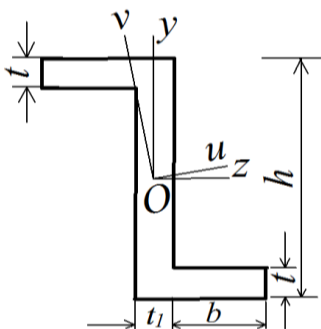


Рис. 3. Z-овый профиль с вертикальной стенкой

Оставляем те же размеры и площадь сечения. Моменты инерции имеют величины: $I_z=6517 \text{ см}^4$, $I_y=3589 \text{ см}^4$, $D_{zy}=-3553 \text{ см}^4$.

Для нахождения положения главной оси инерции, определяемого углом α_0 по отношению к оси z , вычисляем:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2D_{zy}}{I_y - I_z}. \quad (1)$$

$$I_y^{(1)} = \frac{1}{12} t_1 \cos\gamma (h - t_1 \sin\gamma) [(h - t_1 \sin\gamma)^2 \operatorname{tg}^2 \gamma + t_1^2 \cos^6 \gamma], \quad (3)$$

и пренебрегая площадями $\frac{1}{2} t^2 \operatorname{tg} \gamma$ по краям верхнего и нижнего параллелограммов, для каждого из которых:

Значению $\operatorname{tg} 2\alpha_0 = 2,4$ соответствует величина $\alpha_0 = 33^\circ 40'$. Главные моменты инерции равны: $I_u = 9051 \text{ см}^4$, $I_v = 1055 \text{ см}^4$. Модуль экстремального напряжения при $\beta = 30^\circ$ равен $0,0013M$, то есть меньше, чем у сечения швеллера в 2,6 раза. Это является следствием того, что силовая плоскость значительно приблизилась к главной плоскости бруса (угол между ними составляет $3^\circ 40'$).

Если швеллер в качестве прогона «обречен» на косой изгиб, то при Z-овом профиле может произойти трансформация этой сложной деформации в прямой изгиб. Условием для этого служит равенство $\beta = \alpha_0$.

Дальнейшее развитие идеи «обволакивания» материей внешнего силового поля приводит к рассмотрению Z-ового профиля с наклонной стенкой (рис. 4). Это своего рода скачок от качественного преобразования формы сечения, о чем свидетельствуют рисунки 2 и 3, к количественному изменению его параметров (за счет длины и толщины стенки и ее смещения). В этом проявляется стремление к достижению лучшего противостояния нагрузке внутреннего силового поля.

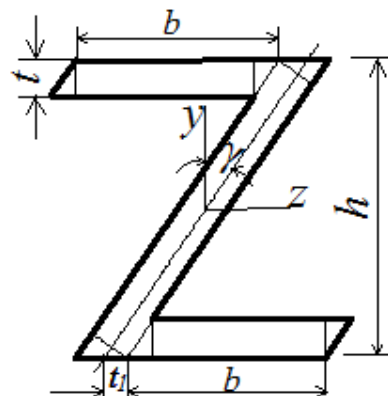


Рис. 4. Z-овый профиль с наклонной стенкой

Такого рода сечение можно представить в виде суммы трех параллелограммов. Момент инерции относительно оси z равен:

$$I_z = \frac{t_1 h^3}{12} + \frac{bt^3}{6} + bt(0,5h^2 - ht + 0,5t^2). \quad (2)$$

Момент инерции относительно оси y вычислим, пренебрегая площадями $\frac{1}{2} t_1^2 \sin\gamma \cos\gamma$ по краям среднего параллелограмма, который представим таким образом приближенно как повернутый прямоугольник с размерами $h - t_1 \sin\gamma$ и $t_1 \cos\gamma$, для которого [22]:

$$I_y^{(2)} = \frac{1}{12} t(b - t \operatorname{tg} \gamma)^3 + t(b - t \operatorname{tg} \gamma) \left[\frac{1}{2} (b - t \operatorname{tg} \gamma) + \frac{t_1}{2} + \frac{h-t}{2} \sin \gamma \right]^2. \quad (4)$$

В итоге

$$I_y = I_y^{(1)} + 2I_y^{(2)}. \quad (5)$$

$$D_{zy} = -\frac{1}{12} h^3 \operatorname{tg} \gamma \left[\frac{t_1}{2} + h \left(\frac{2}{3} \operatorname{tg} \gamma - \frac{1}{12} \right) \right] - 2bt \left(\frac{b}{2} - \frac{h-t}{2} \operatorname{tg} \gamma \right) \frac{h-t}{2}. \quad (6)$$

Оставляем те же размеры и площадь сечения, что и у профиля на рисунке 3. Трансформация косоугольного изгиба в прямой изгиб может произойти ($\beta = \alpha_0 = 30^\circ$) при некотором угле γ . Используя формулу (1), записываем уравнение:

$$\frac{2D_{zy}}{I_y - I_z} = \operatorname{tg} 2\beta. \quad (7)$$

Центробежный момент инерции имеет выражение:

Введя в него величины моментов инерции по формулам (2) – (6) и $\beta = 30^\circ$, получаем уравнение с неизвестным γ (из-за громоздкости не приводится). Для решения трансцендентного уравнения использован графический метод, в результате чего получена величина $\gamma = 7^\circ 30'$.

Вычисляем моменты инерции по формулам (2) – (6): $I_z = 6667 \text{ см}^4$, $I_y = 4282 \text{ см}^4$, $D_{zy} = -2334 \text{ см}^4$, затем главный момент инерции:

$$I_u = 6667 \cdot 0,866^2 + 4282 \cdot 0,5^2 + 2334 \cdot 0,866 = 8091 \text{ см}^4. \quad (8)$$

Модуль экстремального напряжения равен $0,00072M$, что в 1,8 раза меньше, чем в случае Z-ового профиля с вертикальной стенкой.

Рассмотрим теперь чистый косоугольный изгиб при упруго-пластических деформациях. Ему соответствуют следующие условия: 1) линейная деформация по направлению оси бруса (x) $\varepsilon_x = \text{const}$ для любого волокна, взятого в плоскости $y = \text{const}$; 2) кривизна изгиба k_x для всех волокон в каком-либо поперечном сечении принимается постоянной, хотя точные кривизны отдельных волокон неодинаковы; 3) используется идеальный упруго-пластический материал с диаграммой Прандтля; 4) внутренними усилиями являются изгибающие моменты M_z и M_y .

Выведем зависимость между моментами M_z и M_y и кривизнами k_{x1} (в плоскости xOy) и k_{x2} (в плоскости xOz). Используем выражение линейной деформации:

$$\varepsilon_x = k_{x1}y + k_{x2}z, \quad (9)$$

при записи выражений M_z и M_y :

$$M_z = \int_A E_s (k_{x1}y + k_{x2}z) y dA, \quad (10)$$

$$M_y = \int_A E_s (k_{x1}y + k_{x2}z) z dA, \quad (11)$$

где E_s – секущий модуль.

Нейтральная ось (нулевая линия) проходит через центр тяжести сечения (рис. 5) и имеет угловой коэффициент $\operatorname{tg} \varphi = -(k_{x2}/k_{x1})$. В линейно-упругой области нормальное напряжение σ_x пропорционально расстоянию от точки до нулевой линии. Граница между линейно-упругой и пластической областями, определяется уравнением:

$$y = \frac{1}{k_{x1}} (\varepsilon_y - k_{x2}z), \quad (12)$$

где ε_y – деформация, соответствующая пределу текучести σ_y . Возможны два случая расположения пластических областей.

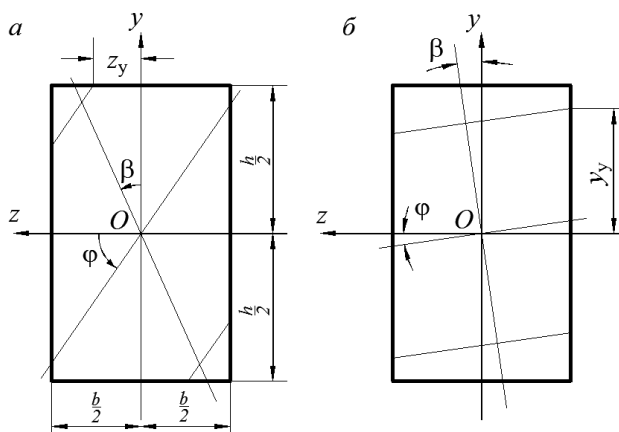


Рис. 5. Поперечное сечение бруса: а – случай 1, б – случай 2 косоугольного изгиба

Случай 1 (рис. 5, а). Начальная абсцисса пластической деформации определяется по формуле:

$$z_y = \frac{1}{k_{x2}} \left(\varepsilon_y - k_{x1} \frac{h}{2} \right). \quad (13)$$

Выражения моментов имеют вид:

$$M_z = 2 \left[E \int_{-b/2}^{z_y} dz \int_0^{h/2} (k_{x1}y + k_{x2}z) y dy + E \int_{z_y}^{b/2} dz \int_0^y (k_{x1}y + k_{x2}z) y dy \right] + 2\sigma_y \int_{z_y}^{b/2} dz \int_y^{h/2} y dy, \quad (14)$$

$$M_y = 2 \left[E \int_{-b/2}^{z_y} z dz \int_0^{h/2} (k_{x1}y + k_{x2}z) dy + E \int_{z_y}^{b/2} z dz \int_0^y (k_{x1}y + k_{x2}z) dy \right] + 2\sigma_y \int_{z_y}^{b/2} z dz \int_y^{h/2} dy. \quad (15)$$

В итоге имеем:

$$M_z = 2E \left[\frac{k_{x1}h^3}{24} \left(\frac{b}{2} + z_y \right) - \frac{k_{x2}h^2}{16} \left(\frac{b^2}{4} - z_y^2 \right) + \frac{k_{x2}^3}{24k_{x1}^2} \left(\frac{b^4}{16} - z_y^4 \right) \right] + \sigma_y \left[\left(\frac{h^2}{4} - \frac{\varepsilon_y^2}{3k_{x1}^2} \right) \left(\frac{b}{2} - z_y \right) + \frac{\varepsilon_y k_{x2}}{2k_{x1}^2} \left(\frac{b^2}{4} - z_y^2 \right) - \frac{k_{x2}^2}{3k_{x1}^2} \left(\frac{b^3}{8} - z_y^3 \right) \right], \quad (16)$$

$$M_y = Eh \left[\frac{k_{x1}h}{8} \left(z_y^2 - \frac{b^2}{4} \right) + \frac{k_{x2}}{3} \left(z_y^3 + \frac{b^3}{8} \right) - \frac{k_{x2}^2}{4k_{x1}h} \left(\frac{b^4}{16} - z_y^4 \right) \right] + \sigma_y \left[\left(\frac{h}{2} - \frac{\varepsilon_y}{2k_{x1}} \right) \left(\frac{b^2}{4} - z_y^2 \right) + \frac{2k_{x2}}{3k_{x1}} \left(\frac{b^3}{8} - z_y^3 \right) \right]. \quad (17)$$

В частном случае при $k_{x2} \rightarrow 0$, $z_y \rightarrow -\frac{b}{2}$ имеем:

$$M_z = b\sigma_y \left(\frac{h^2}{4} - \frac{\varepsilon_y^2}{3k_{x1}^2} \right), \quad M_y = 0. \quad (18)$$

Первая формула характеризует момент при изгибе в плоскости xOy (с учетом того, что $\varepsilon_y / k_{x1} = y_y$).

Случай 2 (рис. 5, б). Выражения моментов имеют вид:

$$M_z = 2 \left[E \int_{-b/2}^{b/2} dz \int_0^y (k_{x1}y + k_{x2}z) y dy + \sigma_y \int_{-b/2}^{b/2} dz \int_y^{h/2} y dy \right], \quad (19)$$

$$M_y = 2 \left[E \int_{-b/2}^{b/2} z dz \int_0^y (k_{x1}y + k_{x2}z) dy + \sigma_y \int_{-b/2}^{b/2} z dz \int_y^{h/2} dy \right]. \quad (20)$$

В итоге имеем:

$$M_z = b\sigma_y \left(\frac{h^2}{4} - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_y^2}{k_{x1}^2} - \frac{b^2}{12} \frac{k_{x2}^2}{k_{x1}^2} \right), \quad (21)$$

$$M_y = \frac{1}{6} \sigma_y b^3 \frac{k_{x2}}{k_{x1}}. \quad (22)$$

Нелинейный характер зависимостей (16), (17), (21), (22) нацеливает на использование обратного метода, предусматривающего построение номограмм $M_z \sim (k_{x1}, k_{x2})$ и $M_y \sim (k_{x1}, k_{x2})$. Задаются величины кривизн k_{x1}, k_{x2} и по формулам (16), (17), (21), (22) вычисляются моменты M_z и M_y . Построенные номограммы используются при расчетах напряженно-деформированного состояния бруса, силовая плоскость которого содержит момент M .

Существует и другой путь решения задачи. Задаются характеристики материала: предел текучести σ_y , модуль продольной упругости E , размеры сечения b и h , положение силовой плоскости (угол β) и координаты точки на границе упругой и пластической областей z_y, y_y . По формулам (16), (17), (21), (22) вычисляются моменты M_z и M_y , после чего составляется уравнение $M_y / M_z = \operatorname{tg} \beta$, в котором неизвестными являются кривизны k_{x1}, k_{x2} . Второе уравнение составляется на основе условия пластичности в заданной точке на границе упругой и пластической областей. Решение системы двух уравнений дает величины k_{x1} и k_{x2} . Затем находим величину $M = M_y / \sin \beta$ и строим кривые: $M \sim k_{x1}$ и $M \sim k_{x2}$, которые используются в расчетах напряженно-деформированного состояния бруса.

Момент $M = M_{(y)}$, отвечающий пределу пластического сопротивления при косом изгибе, вычисляется в предположении равенства $\sigma_x = \sigma_y$ по всей площади сечения.

Для случая 1 ($0 \leq k_{x1}/k_{x2} \leq b/h$) имеем:

$$M_{(y)} = \sigma_y \frac{hb^2}{4} \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{k_{x1}}{k_{x2}} \frac{h^2}{b^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{3} \frac{k_{x1}^2}{k_{x2}^2} \frac{h^2}{b^2}\right)^2}. \quad (23)$$

В частном случае при $k_{x1} = 0$

$$M_{(y)} = \sigma_y \frac{hb^2}{4}. \quad (24)$$

Для случая 2 ($0 \leq k_{x2}/k_{x1} \leq h/b$) имеем:

$$M_{(y)} = \sigma_y \frac{bh^2}{4} \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{k_{x2}}{k_{x1}} \frac{b^2}{h^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{3} \frac{k_{x2}^2}{k_{x1}^2} \frac{b^2}{h^2}\right)^2}. \quad (25)$$

В частном случае при $k_{x2} = 0$

$$M_{(y)} = \sigma_y \frac{bh^2}{4}. \quad (26)$$

Суждения, касающиеся имеющей место идеализации так называемого пластического шарнира, соотносятся со строгостью применения физического закона в виде диаграммы Прандтля.

Выводы. Идея перехода от косого изгиба к прямому, то есть от сложной к простой деформации, сопряжена с теорией структурного синтеза, что в данном случае выражается в поиске оптимальной конфигурации. Вариационная постановка задачи структурного синтеза сводится к итерационной процедуре расчета. Более приемлемой оказалась вытекающая из нее идея «обволакивания» материей силового поля, имеющая также обоснование с позиций биомеханики.

В качестве целевой функции избраны экстремальные напряжения, зависящие от конфигурации сечения. Целенаправленное сопоставление швеллера и Z-ового профиля выявило значительное преимущество последнего. Завершающий шаг от косого изгиба к прямому – переход в сечении от вертикальной к наклонной стенке. Эта задача решается при исходных размерах и площади сечения, полученных при оптимизации Z-ового профиля с вертикальной стенкой. Достигнуто уменьшение экстремального напряжения в 1,8 раза.

Решена физически нелинейная задача косого изгиба бруса из материала с диаграммой Прандтля. Предложен обратный метод, предусматривающий построение номограмм – зависимостей внутренних усилий от кривизн, которые затем используются для расчетов напряженно-деформированного состояния бруса.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes – Butterworths, 1979. 238 p.
2. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method // Int. J. Numer. Methods Eng. 1992. No 35. Pp. 1487–1502.
3. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design // Advances in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
4. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topology optimization // Structural Optimization. 1995. No 9. Pp. 245–249.
5. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures // J. of the Bras. Soc. of Mech. Sci&Eng. 2003. Vol. 25. No. 3. Pp. 293–301.
6. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam / column elements // Engineering Structures. 2012. No 37. Pp. 106–124.
7. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Тр. Крыловского Гос. науч. центра. 2020. №1 (391). С. 95–108. DOI:10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108
8. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т.15. Вып. 1. С. 12–30. DOI:10.22227/1997-0935.2020.1.12-30
9. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия вузов. Строительство. 2021. № 6. С. 20–31. DOI:10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32
10. Лоцманова В.С., Владимирова Е.А. Оптимизация опорных устройств рамных систем на основе энергетического критерия // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства. Гродно, 2021. С. 141–145.
11. Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd. 1-2. Leipzig, 1895.
12. Фрайман Ф.И. Оптимальное проектирование тонкостенной балки коробчатого сечения при косом изгибе // Прикл. механика. 1971. № 11. С. 96–104.

13. Почтман Ю.М. К вопросу о выборе оптимальной формы сечений при косом изгибе // Известия вузов. Машиностроение. 1972. №2. С. 9–12.

14. Софронов Ю.А. Об оптимальной форме поперечного сечения балки при косом изгибе // Тр. Казан. авиац. ин-та. Вып. 189. 1975. С. 36–42.

15. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 с.

16. Зинькова В.А. Оптимизация топологии металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 37–40.

17. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. No 5. Vol. 10. Pp. 12391–12398.

18. Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости // Вестник БГТУ им. В.Г.

Шухова. 2022. № 3. С. 25–31. DOI:10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31

19. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength // Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques. 1960. Vol. 8. No. 6. Pp. 259–268.

20. Юрьев А.Г., Толбатов А.А., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Рациональное сечение бруса при косом изгибе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 60–63. DOI:10.12737/article_5a001ab28c24b0.04912816

21. Романюк В.В., Василенко В.Б. Деформативность конструкции перфорированного прогона Z-образного профиля в условиях косоугольного изгиба // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. №1 (16). С. 111–119. DOI:10.53078/20778481_2015_1_111

22. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

Информация об авторах

Юрьев Александр Гаврилович, доктор технических наук, профессор. E-mail: yuriev_ag@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Зинькова Виктория Анатольевна, начальник отдела создания и оценки объектов интеллектуальной собственности, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.09.2023 г.

© Юрьев А.Г., Зинькова В.А., 2023

***Yuriev A.G., Zinkova V.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: yuriev_ag@mail.ru*

NON LINEAR PROBLEMS OF OBLIQUE BENDING

Abstract. Building art consists in the unity of the function of the structure and its form, embodied in the material. The bearing capacity of the material depends entirely on the chosen form. This is expressed in the rational correlation of load and support. At the level of determining the topology of a structure, the process of “enveloping” a force field in natural systems by matter is considered as an analogy. This phenomenon correlates with the technical support of the oblique bend, which is typical, in particular, for the run of the roof of the structure. A channel that is rational under conditions of direct bending loses its effectiveness with oblique bending. The best performance is found in the Z-profile with a vertical wall. The orientation of its shelves corresponds to the principle of material saturation of the areas adjacent to the external force field. But even this profile does not fully satisfy the most effective resistance to oblique bending. The introduction of an inclined wall makes it possible to bring the material of the shelves closer to the external force field. A comparison of the functioning of the mentioned profiles is given on numerical examples, united by the designated cross-sectional area. For a Z-profile with an inclined wall, formulas for geometric characteristics are derived. The angle of inclination of the wall is determined from the condition of transforming an oblique bend into a straight bend, that is, the coincidence of the trace of the force plane with the main axis of the beam section. In the framework of the above studies, we can talk about a decrease in stress by about 80%. It is also oblique bending at nonlinear physical law considered.

Keywords: cross-sectional shape of the beam, load-bearing capacity of the material of construction, oblique bend, Z-profile with an inclined wall, Prandtl's diagram.

REFERENCES

1. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes – Butterworths, 1979. 238 p.
2. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 1992. No 35. Pp. 1487–1502.
3. Rozvany G. I. N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design. *Advances in design optimization*. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
4. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topology optimization. *Structural Optimization*, 1995. No 9. Pp. 245–249.
5. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures. *J. of the Bras. Soc. Of Mech. Sci&Eng.* 2003. Vol. 25. No. 3. Pp. 293–301.
6. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam. *Column elements. Engineering Structures*. 2012. No. 37. Pp. 106–124.
7. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Complex approach to topologic and geometric optimization of ship's constructions [Kompleksnyj podkhod k topologicheskoy optimizacii sudovykh konstrukcij]. *Memoirs of Krylov's State Scientific Center*. 2020. No 1 (391). Pp. 95–108. (rus)
8. Tamrazjan A.G., Alekseyev A.V. Modern optimization methods of constructive solutions for supporting systems of buildings and structures [Sovremennye metody optimizacii konstruktivnykh reshenij dlya nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. *Bulletin of MSBU*. 2020. Vol.15. No. 1. Pp. 12–30. (rus)
9. Mishchenko A.V. Optimization of lattice-nonhomogeneous pivotal constructions on the basis of energy criterion [Optimizaciya strukturno neodnorodnykh sterzhnevyykh konstrukcij na osnove energeticheskogo kriteriya]. *News of Institutions of Higher Education. Building*. 2021. No. 6. Pp. 20–31. (rus)
10. Locmanova V.S., Vladimirova E.A. Supporting systems optimization of frames on the basis of energy criterion [Optimizaciya opornykh ustrojstv ramnykh sistem na osnove energeticheskogo kriteriya]. *Traditions, Modern Problems and Perspectives of Building Development. Grodno*. 2021. Pp. 141–145. (rus)
11. Roux W. *Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen*. Bd. 1-2. Leipzig, 1895.
12. Frajman F.I. Optimal design of a thin-shelled beam with box section under oblique bend [Optimal'noe proektirovanie tonkostennoj balki korobchatogo secheniya pri kosom izgibe]. *Applied Mechanics*. 1971. No 11. Pp. 96–104. (rus)
13. Pochtman Y.M. At question on selection of optimal cross-sections form under oblique bend [K voprosu o vybore optimal'noj formy sechenij pri kosom izgibe]. *News of Institutions of Higher Education. Mechanical Engineering*. 1972. No. 2. Pp. 9–12. (rus)
14. Sofronov Y.A. About optimal shape of beam cross-section under oblique bend [Ob optimal'noj forme poperechnogo secheniya balki pri kosom izgibe]. *Memoirs of Kazan Aviation Institute. Issue 189*. 1975. Pp. 36–42. (rus)
15. Yuriev A.G. Variational principles of structural mechanics [Variacionnye principy stroitel'noj mehaniki]. Belgorod: Publishing house of BelGTASM. 2002. 90 p. (rus)
16. Zinkova V.A. Topology optimization of metallic trusses [Optimizaciya topologii metallicheskih ferm]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 2. Pp. 37–40. (rus)
17. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. No. 5. Vol. 10. Pp. 12391–12398.
18. Yuriev A.G., Smoljago N.A., Yakovlev O.A. Displacements in pivotal systems over elasticity limit [Peremeshcheniya v sterzhnevyykh sistemah za predelom uprugosti]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 3. Pp. 25–31. (rus)
19. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength. *Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques*. 1960. Vol. 8. No. 6. Pp. 259–268.
20. Yuriev A.G., Tolbatov A.A., Smoljago N.A., Yakovlev O.A. Rational cross-section of a beam under oblique bend [Raczional'noe sechenie brusa pri kosom izgibe]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 11. Pp. 60–63. (rus)
21. Romanjuk V.V., Vasilenko V.B. Construction deformationity of perforated purlin with Z-profile under oblique bend [Deformativnost' konstrukczii perforirovannogo progona Z-obraznogo profilya v usloviyah kosogo izgiba]. *Bulletin of Byelorussia-Russia University*. 2015. No 1 (16). Pp. 111–119. (rus)
22. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Handbook with respect to strength of materials [Spravochnik po soprotivleniyu materialov]*. Kiev: Scientific Idea, 1988. 736p. (rus)

Information about the authors

Yuriev, Alexandr G. DSh, Professor. E-mail: yuriev_ag@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zinkova, Viktoriya A. PhD, Assistant professor. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 01.09.2023

Для цитирования:

Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Нелинейные задачи косого изгиба // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 37–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45

For citation:

Yuriev A.G., Zinkova V.A. Non linear problems of oblique bending. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 37–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-46-53

^{1,*}Мавлюбердинов А.Р., ¹Богданов Р.Р., ²Сулейманова Л.А.¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: mazatr73@mail.ru

К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с проведением капитального ремонта крупнопанельных жилых зданий. Авторы уделяют внимание ключевому аспекту этого процесса, а именно ремонту стыков стеновых панелей, а также методам, позволяющим выявить места, где нарушена герметичность швов в панельных домах. Одним из важных этапов исследования является тепловизионное сканирование, которое позволяет точно определить участки с наибольшими потерями тепла и выявить проблемные зоны, требующие немедленного вмешательства. В статье также представлено краткое описание различных видов герметиков и областей их применения в контексте ремонта стыковых швов стен. Это имеет существенное значение, поскольку выбор правильных герметиков и их правильное применение могут существенно повысить эффективность и долговечность ремонта. Авторы исследования подчеркивают не только важность правильного ремонта стыков стеновых панелей, но и необходимость соблюдения требований по эксплуатации зданий и своевременного проведения капитальных ремонтов с использованием качественных материалов. Это является ключевым фактором для обеспечения долговечности стыков стеновых панелей. Эффективный капитальный ремонт способствует созданию благоприятного микроклимата внутри помещений и снижению энергозатрат, что важно не только с точки зрения улучшения условий жизни, но и с экономической точки зрения в современной строительной индустрии.

Ключевые слова: панельное домостроение, стыки панелей, герметизация, ремонт, тепловизионное обследование.

Введение. На современном этапе развития строительной отрасли как в России, так и за рубежом применение бетонных и железобетонных конструкций носит преобладающий характер. В прошлом столетии широко использовался сборный железобетон при строительстве жилых, общественных зданий, а именно в качестве плит и панелей перекрытия и покрытия, стеновых ограждений. Для решения задачи возведения крупнопанельных зданий был отмечен значительный рост промышленности сборного железобетона. Массовый переход на строительство крупнопанельных зданий привел к некоторому перекосу в производстве строительных материалов, а именно снизилось производство мелкоштучных стеновых изделий (кирпич и блоки). Типизация строительства крупнопанельных зданий привела к однообразию и безликости жилых микрорайонов, а также к невозможности свободной перепланировки. Одним из положительных качеств крупнопанельного домостроения является скорость строительства.

Эксплуатация многоквартирных домов должна быть направлена на сохранение целостности и работоспособности всех конструктивных элементов и инженерных систем здания. Это включает в себя обеспечение нормативного функционирования систем отопления, водоснабжения, канализации, электроснабжения, лифтового оборудования и других систем, обеспечивающих комфортное проживание жителей.

В панельных зданиях особое внимание уделяется состоянию швов между панелями, так как именно они могут стать источником проникновения влаги и образования трещин. Дефекты в наружных стенах могут возникать из-за деформации отдельных элементов, что может привести к снижению теплозащитных свойств стен и увеличению энергопотребления на отопление. Деформации и повреждения могут быть вызваны различными факторами, включая ошибки при проектировании, некачественное строительство, износ материалов и воздействие атмосферных условий. Для предотвращения этих проблем необходимо проводить регулярные осмотры и обследования зданий, а также своевременно проводить ремонт и замену изношенных элементов [1–4].

Помимо технического обслуживания, эксплуатация многоквартирных домов также включает в себя поддержание чистоты и порядка в подъездах, на лестничных клетках, во дворах, на детских и спортивных площадках. Также важно обеспечить доступность зданий для маломобильных групп населения, организовать работу и контроль за работой управляющих компаний и обслуживающих организаций. Для предотвращения данных нежелательных явлений выполняют работы по восстановлению герметичности стыков зданий [5–11].

Ухудшение герметичности может быть вызвано различными причинами, связанными как с

производственными и технологическими процессами, так и с климатическими условиями.

Производственные и технологические факторы включают:

- неточность в размерах стеновых панелей, изготовленных на производстве, что приводит к нарушению проектных размеров при их соединении;

- нарушение требований к монтажу, таких как отклонение от вертикали, смещение, перекос, изменение размеров стыковых соединений и т.д.;

- изменения в размерах стыковых соединений из-за процессов ползучести и усадки бетона (1,5–2,0 мм на стык).

Климатические факторы включают:

- попеременное замораживание и оттаивание воды в межпанельных швах, которое приводит к разрушению материалов и ухудшению герметичности;

- изменения в размерах стыков из-за температурных колебаний (0,5–1,0 мм на стык);

- воздействие ультрафиолетового излучения и солнечной радиации на стыковые соединения, которое может привести к их разрушению и потере герметичности.

Материалы и методы. Тепловизионное обследование панельных домов позволяет обнаружить теплопотери, вызванные нарушениями в теплоизоляции стыков между панелями. Эти

нарушения могут привести к ухудшению микроклимата внутри помещения, проникновению влаги, образованию сырости и усиленной работе систем отопления и кондиционирования [12].

Одним из наиболее опасных последствий является промерзание стыков панелей, которое вызывает постоянное увлажнение и снижает прочность конструкций здания. Это, в свою очередь, сокращает срок его эксплуатации и повышает стоимость обслуживания.

Для предотвращения этих последствий необходимо проводить своевременную герметизацию межпанельных швов или ремонт межпанельных соединений. В рамках исследований проводится тепловизионное обследование, которое позволяет комплексно решить ключевые задачи в области нивелирования теплопотерь и выявить дефекты в ограждающих конструкциях.

Основная часть. Проведенные авторами тепловизионные исследования позволили получить температурные поля в виде изображений с различной яркостью, соответствующей различным температурам. Различные цвета на изображении тепловизора соответствуют различным температурам исследуемой поверхности (рис. 1). Тепловизоры также могут отображать изотермические поверхности, то есть поверхности с одинаковой температурой. Выходной сигнал тепловизора прямо пропорционален измеряемой температуре исследуемой поверхности.

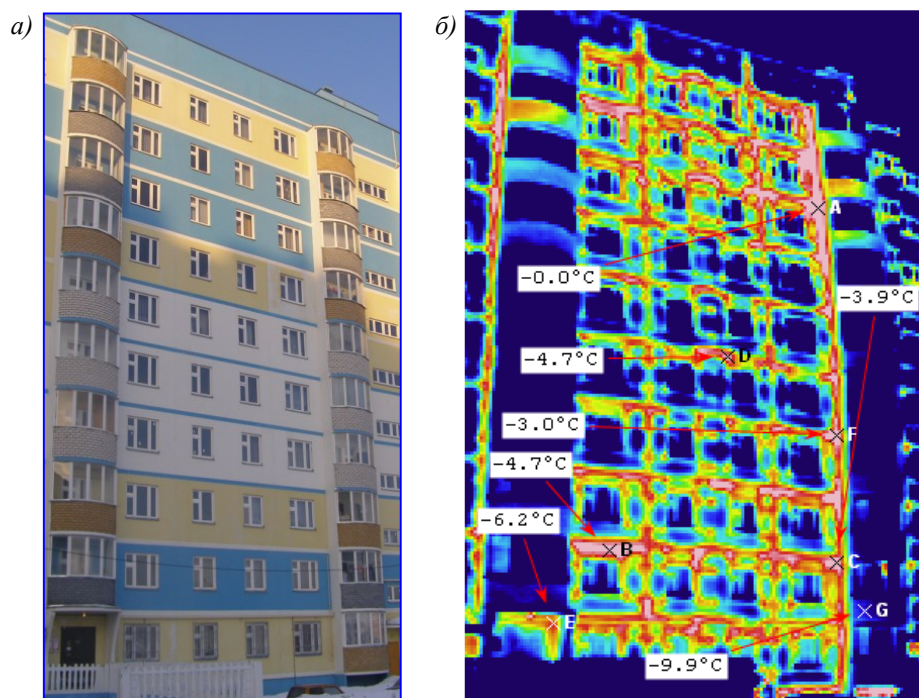


Рис. 1. Термографические изображения: а – изображение исследуемой поверхности ограждающей конструкции; б – изображение тепловизора при температуре наружного воздуха -10°C

По результатам исследования теплотехнических параметров ограждающих конструкций и

микроклимата помещений квартиры тепловизионным методом установлено, что температуры в

вышеперечисленных зонах не соответствуют нормативным требованиям.

Температурный перепад между температурой воздуха в помещении и температурой поверхности стены должен быть в пределах 4°C . Температуры в теплопроводных участках должны быть выше температуры точки росы. При пересчете полученных результатов на расчетные $t_{\text{н}} = -32^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{в}} = +21^{\circ}\text{C}$, температуры в обследуемых участках будут ниже температуры точки росы, то есть ниже 12°C .

Проблема устранения дефектов стен панельных зданий, а именно стыков панелей требует комплексного решения с использованием нескольких типов материалов, таких как монтажный пенополиуретан, герметик или мастика для герметизации и гидроизоляции, вспененная полиэтиленовая или полипропиленовая трубчатая теплоизоляция, штукатурка, цементно-песчаная смесь и др.

Технология ремонта сводится к выполнению нескольких последовательных операций. На первоначальном этапе межпанельный шов заполняется пеной, прокладывается труба теплоизоляционного материала, после чего весь комплект изоляционных материалов закрывается герметиком и иногда оштукатуривается вдоль вертикальных и горизонтальных швов.

Кроме того, на сегодняшний день откорректирована методика определения площади, на которой нужно провести ремонтные работы. Если

раньше место для ремонта было определено визуально, с небольшим выступом на полметра до каждого края, то сегодня есть четкий алгоритм ремонта. Если площадь вертикального шва повреждена, все соседние горизонтальные швы подлежат осмотру и ремонту. Аналогично, если горизонтальное межпанельное соединение оказались разрушенными, то, конечно, секции вертикальных швов, пересекающих проблемные горизонтальные участки, обязательно подвергаются ремонту.

Для снижения стоимости работ по герметизации стыков в панельных зданиях были разработаны различные технологии ремонта.

Первая технология – это восстановление целостности слоя герметика. Если при осмотре стыков не было обнаружено серьезных дефектов, то новый слой герметика просто наносится поверх старого. При этом старая гидроизоляция и теплоизоляционные материалы не удаляются.

Вторая технология – это полная замена гидроизоляции. В этом случае старый герметик и гидроизоляционный слой полностью удаляются, а затем наносятся новые материалы.

Третья технология – «теплый шов» – предполагает полную замену теплоизоляционных материалов, гидроизоляции и наружного слоя герметика на новые. Данный метод обеспечивает более высокое качество ремонта и улучшение теплоизоляционных характеристик стыков (рис. 2).

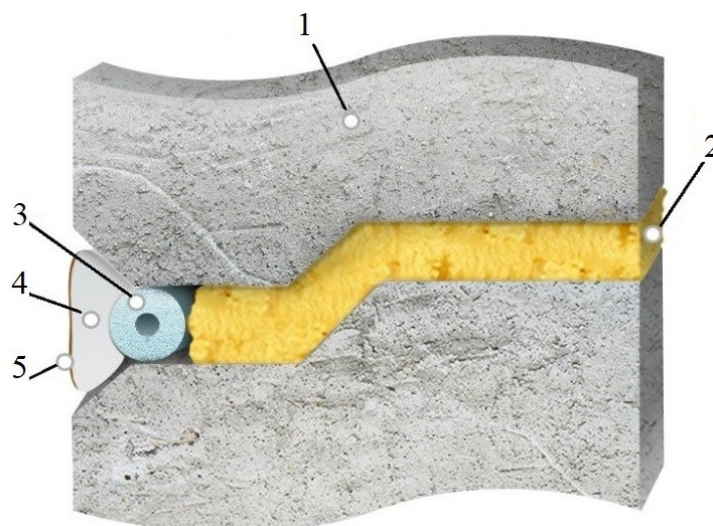


Рис. 2. Технология «теплый шов»: 1 – стеновая панель; 2 – монтажная пена; 3 – вилатерм; 4 – герметик; 5 – краска

Из практики использования различных типов герметиков, полиуретановый клей «Germaflex 1227» показал себя как наиболее эффективный. Он обладает отличной адгезией к бетону и позволяет получить плотное и прочное соединение.

Капитальный ремонт межпанельных швов включает в себя полную замену и герметизацию

изоляционной и гидроизоляционной системы. Сначала необходимо открыть и очистить швы между панелями от старого изоляционного материала, остатков гидроизоляции и герметика. Рабочие выполняют эти операции на высоте, находясь в подвешенном состоянии на специальных скамейках. Для удаления старого материала

используются ручные инструменты, такие как шпатели и резак.

Очистка межпанельных швов может производиться с использованием специализированных чистящих устройств, которые позволяют резать резину и пластик и удалять бетон из швов. Однако, работа с этими устройствами на высоте может быть неудобной и трудоемкой.

После очистки шва его полость промывается водой и заполняется монтажной пеной. Пока пена не затвердела, в шов вставляется прокладка из вспененного полиэтилена (например, «Вилатерм») или полипропилена («Пенофлекс»). Затем в прокладку также заливается монтажная пена, которая после затвердевания обрезается, чтобы верхний слой герметика не выступал над поверхностью фасада.

Нанесение герметика и его зачистка могут выполняться вручную или с использованием специального пистолета. Данная работа сложная и трудоемкая и требует значительной физической силы, так как монтажник за одну смену должен уложить несколько десятков цилиндрических прокладок. Поэтому, для герметиков нередко применяется старый способ с помощью шпателя. От качества и точности укладки слой герметика, зависит стабильность межпанельного уплотнения шва и его долговечность. Средний срок службы составляет около 10 лет.

После герметизации межпанельный шов должен быть обработан раствором гипса, защищающим полимер от морозов и окисления.

При выполнении работ по герметизации стыков стеновых панелей при новом строительстве предусматривается комплекс действий для обеспечения надежности и долговечности конструкции.

Перед началом работ проводится визуальный осмотр стыкуемых элементов на предмет повреждений, и при их обнаружении дефекты ремонтируются с использованием полимерцементных составов. Этот комплекс мероприятий гарантирует надежную герметизацию стыков стеновых панелей, что важно для обеспечения качественной защиты строения от внешних факторов.

Поверхности стыкуемых элементов до начала работ очищаются и обезжириваются. Для этого их высвобождают от избыточного раствора и грязи с использованием пневматических и электрических щеток, тряпок и сушильных приспособлений. После монтажа панелей этажа рекомендуется устанавливать уплотняющую прокладку. Они должны быть обжаты не более чем на 20–50 % от диаметра. При герметизации стыков стеновых панелей с устьями шириной менее 12 мм, разрешено использовать биостойкие материалы. Прокладки, применяемые для уплотнения

швов в устьях стыков, должны располагаться непрерывной линией без допуска разрывов. При укладке прокладок следует избегать натяжения и соединять их по длине клейкой лентой, используя при этом закругленный деревянный шпатель. Важно отметить, что работы по герметизации стыков следует выполнять при температурах не ниже -10°C .

Экономический эффект исследований можно оценить путем проведения соответствующих расчетов на примере 5-подъездного 10-этажного жилого здания строительным объемом отапливаемой части 54 тыс. м^3 . Среднерыночная стоимость тепловизионного обследования качества тепловой защиты 270 000 руб. для данного дома.

Расчеты выполнены для следующих условий:

- Расчетная температура внутреннего воздуха $= 21^{\circ}\text{C}$.
- Фактическая температура наружного воздуха $= -10^{\circ}\text{C}$.
- Средняя фактическая температура наружного воздуха отопительного периода в году $= -5,2^{\circ}\text{C}$.
- Продолжительность отопительного периода в году для г. Казань $= 215$ сут.
- Текущий тариф на тепловую энергию на 1 квартал 2023 г. составляет 1691,38 руб/Гкал.
- Периодичность капитального ремонта (согласно ВСН 58-88) $= 20$ лет.

При проведении тепловизионного обследования качества тепловой защиты здания выявлены дефекты, определены размеры ущерба, вызванного дефектами и оценены траты на их устранение. Результаты обследования представлены в табл. 1.

Проведенное тепловизионное обследование здания позволило выявить основные проблемные участки, где существует ухудшение качества теплозащиты. Это означает, что в этих местах тепло легко проникает или уходит из здания, что приводит к дополнительным затратам на отопление.

Результаты расчетов, основанные на данных тепловизионного обследования, позволили оценить экономический эффект данного вмешательства. Дополнительные затраты на оплату тепла до проведения капитального ремонта из-за ухудшения качества теплозащиты и некомпенсированные устранением локальных дефектов составили 12 850 935,3 руб. Сравнив эту сумму с затратами на проведение тепловизионного обследования и последующее устранение выявленных дефектов в размере 4 091 500 руб., можно сделать вывод, что данные вложения оправданы.

Таблица 1

Результаты тепловизионного обследования дефектов и оценка затрат на их устранение

	Требуемое сопротивление теплопередаче, м²С/Вт	Суммарная площадь дефектов, м²	Фактическое приведенное сопротивление теплопередаче, м²С/Вт	Дополнительные потери тепла стыки конструкций, Гкал/год	Суммарные затраты на устранение нарушения, руб.
1. Дополнительные затраты на оплату тепла до капитального ремонта из-за ухудшения качества теплозащиты, некомпенсированные устранением локальных дефектов					
Общие дефекты, вызванные технологическими нарушениями производства строительных материалов и конструкций	3,45	8700	2,2	215,17	7 278 684,7
Локальное нарушение технологии монтажа и конструкций наружных стен		525		4,93	166 770,1
Общие дефекты, вызванные технологическими нарушениями производства стеклопакетов, используемых при заполнении световых проемов зданий	0,6	1940	0,47	136,36	4 612 731,5
Локальное нарушение монтажа оконных блоков, вызывающее повышенные теплопотери		129		23,435	792 749
Итого					12 850 935,3
2. Дополнительные затраты на устранение дефектов теплозащиты, приводящих к нарушению санитарно-гигиенических требований безопасности жилища					
Локальные нарушения технологии исполнения узлов стыков и примыканий конструкций стены	3,45	5250	2,2	-	3 571 500
Локальное нарушение технологии исполнения узлов примыканий и регулировки конструкций оконных блоков (500 шт.)	0,6	-	0,47	-	250 000
Итого					3 821 500

В долгосрочной перспективе затраты на тепловизионное обследование и устранение дефектов теплозащиты будут компенсированы сокращением издержек на излишнее отопление жилых зданий.

Выводы. На основании представленных данных в научной статье можно сделать следующие количественные выводы:

Процесс герметизации стыков стеновых панелей при строительстве включает несколько важных этапов, включая устройство изоляции швов, укладку прокладок в устья стыков и нанесение уплотнительной мастики. Важность герметизации подтверждается тем, что некачественная герметизация может привести к дополнительным затратам. Например, в статье упоминается, что дополнительные расходы на отопление до проведения капитального ремонта из-за ухудшения качества теплозащиты составили 12 850 935,3 руб. Сравнив эти затраты с расходами на тепловизионное обследование и последующее устранение выявленных дефектов в размере 4 091 500 руб., можно заключить, что вложения в улучшение теплоизоляции будут оправданы. Это означает, что эти вложения будут компенсированы сокращением издержек

на излишнее отопление жилых зданий в будущем.

Таким образом, правильная герметизация и теплоизоляция в строительстве могут привести к конкретным экономическим выгодам, что является важным аспектом как с точки зрения энергосбережения, так и с точки зрения оптимизации операционных расходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варламова Л.А., Рынкова М.В. Герметизация крупнопанельных жилых домов // Теория и практика современной науки. Минск. 2017. С. 20–26.
2. Новосельцева Е.Л., Шалагинова Н.В., Чарушина М.С. Повышение энергоэффективности стыков панельных домов новых и старых серий // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция ВГУ. Киров. 2017. С. 1640–1649.
3. Ткаченко Т.В. Герметизация Межпанельных швов в стеновых панелях // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. Кемерово. 2017. С. 126–131.
4. Lozinsky C.H., Touchie M.F. Quantifying suite-level airtightness in newly constructed multi-unit residential buildings using guarded suite-level air leakage testing // Building and Environment.

2023. Vol. 236. P. 110273. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110273.

5. Николаев С. В. Панельные и каркасные здания нового поколения // Жилищное строительство. 2013. № 8. С. 2–10.

6. Malakhova A., Davletbaeva D. The consideration of compliance of structural joints in calculation of large panel buildings // In E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 04010.

7. Yang S., Cho H.M., Yun B.Y., Hong T., Kim S. Energy usage and cost analysis of passive thermal retrofits for low-rise residential buildings in Seoul // Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021. Vol. 151. 111617. DOI:10.1016/j.rser.2021.111617.

8. Wardach M. Assessment of the degradation state of joints in large-panel buildings // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 145. P. 107020. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.107020.

9. Knyziak P. The quality and reliability in the structural design, production, execution and maintenance of the precast residential buildings in Poland in the past and now // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 691. P. 420–431.

10. Kokas B., Balogh J., Borsos A., Medvegy G. Bachmann B. Harmonization of structural and functional lifespans of prefabricated residential

buildings // Int. J. Des. Nat. Ecodynamics. 2020. Vol. 15(2). Pp. 161–165.

11. Лукманова Л.В., Мухаметрахимов Р.Х. Панельные здания с эффективным теплоизоляционным слоем и облицовкой // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2016. № 7. С. 264–267.

12. Алексеева Е.А., Еремин К.И., Комов Е.П., Лебедев О.В., Поздняков В.С., Сеннович Д.В., Троицкий-Марков Р.Т. Практика проведения теплового неразрушающего контроля при энергетических обследованиях многоквартирных жилых домов // Наука и Безопасность. 2013. № 4(9). С. 93–125.

13. Овсянников С.Н., Максимов В.Б. Энергоэффективные наружные стеновые панели каркасно-панельных зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 6. С. 107–114.

14. Данель В.В. Решение проблемы вертикальных стыков наружных стеновых панелей // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 44–45.

15. Варламова Л.А., Рыикова М.В. Герметизация крупнопанельных жилых домов // Теория и практика современной науки: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск. Минск: Навуковы свет, 2017. С. 20–26.

Информация об авторах

Мавлюбердинов Азат Рашидович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства. E-mail: mazatr73@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д.1.

Богданов Руслан Равильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства. E-mail: bogdanov.r.r@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д.1.

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

Поступила 02.10.2023 г.

© Мавлюбердинов А.Р., Богданов Р.Р., Сулейманова Л.А., 2023

^{1,*}Mavlyuberdinov A.R., ¹Bogdanov R.R., ²Suleymanova L.A.

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

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

E-mail: mazatr73@mail.ru

ON THE ISSUE OF SOLVING THE PROBLEM OF OPERATION OF PANEL BUILDINGS

Abstract. This article discusses issues related to the overhaul of large-panel residential buildings. The authors pay attention to a key aspect of this process, namely the repair of the joints of wall panels, as well as methods to identify places where the tightness of the seams in panel houses is broken. One of the important stages of the study is thermal imaging scanning, which allows you to accurately determine areas with the greatest heat loss and identify problem areas that require immediate intervention. The article also provides a brief description of the different types of sealants and their applications in the context of wall joint repairs. This is significant because choosing the right sealants and applying them correctly can greatly improve the

effectiveness and longevity of a repair. The authors of the study emphasize not only the importance of proper repair of wall panel joints, but also the need to comply with building maintenance requirements and timely major repairs using high-quality materials. This is key to ensuring the durability of wall panel joints. Effective major renovations help create a favorable indoor microclimate and reduce energy costs, which is important not only from the point of view of improving living conditions, but also from an economic point of view in the modern construction industry.

Keywords: *panel housing construction, panel joints, sealing, repairs, thermal imaging considerations.*

REFERENCES

1. Varlamova L.A., Rynkova M.V. Sealing of large-panel residential buildings [Germetizatsiya krupnopanel'nyh zhilyh domov]. Teoriya i praktika sovremennoj nauki. Minsk. 2017. Pp. 20–26. (rus)
2. Novoseltseva E.L., Shalaginova N.V., Charushina M.S. Increasing the energy efficiency of joints of panel houses of new and old series [Povyshenie energoeffektivnosti stykov panel'nyh domov novyh i staryh serij]. Vserossiyskaya ezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya VGU. Kirov. 2017. Pp. 1640–1649. (rus)
3. Tkachenko T.V. Sealing of interpanel seams in wall panels [Mezhpanel'nyh shvov v stenovyh panelyah]. Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendencii i perspektivy razvitiya. Kemerovo. 2017. Pp. 126–131. (rus)
4. Lozinsky C.H., Touchie M.F. Quantifying suite-level airtightness in newly constructed multi-unit residential buildings using guarded suite-level air leakage testing. Building and Environment. 2023. Vol. 236. 110273. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110273.
5. Nikolaev S.V. Panel and frame buildings of a new generation [Panel'nye i karkasnye zdaniya novogo pokoleniya]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2013. No. 8. Pp. 2–10. (rus)
6. Malakhova A., Davletbaeva D. The consideration of compliance of structural joints in calculation of large panel buildings. In E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 04010.
7. Yang S., Cho H.M., Yun B.Y., Hong T., Kim S. Energy usage and cost analysis of passive thermal retrofits for low-rise residential buildings in Seoul. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 151. Pp. 111617. DOI:10.1016/j.rser.2021.111617.
8. Wardach M. Assessment of the degradation state of joints in large-panel buildings. Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 145. 107020. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.107020.
9. Knyziak P. The quality and reliability in the structural design, production, execution and maintenance of the precast residential buildings in Poland in the past and now. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 691. Pp. 420–431.
10. Kokas B., Balogh J., Borsos A., Medvegy G., Bachmann B. Harmonization of structural and functional lifespans of prefabricated residential buildings. Int. J. Des. Nat. Ecodynamics. 2020. Vol. 15(2). Pp. 161–165.
11. Lukmanova L.V., Mukhametrakhimov R.Kh. Panel buildings with an effective thermal insulation layer and cladding [Panel'nye zdaniya s effektivnym teploizolyacionnym sloem i oblicovkoj]. Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona. 2016. No. 7. Pp. 264–267. (rus)
12. Alekseeva E.A., Eremin K.I., Komov E.P., Lebedev O.V., Pozdnyakov V.S., Sennovich D.V., Troitsky-Markov R.T. Practice of thermal non-destructive testing during energy inspections of multi-apartment residential buildings [Praktika provedeniya teplovogo nerazrushayushchego kontrolya pri energeticheskikh obsledovaniyakh mnogokvartirnyh zhilyh domov]. Nauka i Bezopasnost'. 2013. No. 4(9). Pp. 93–125. (rus)
13. Ovsyannikov S.N., Maksimov V.B. Energy-efficient external wall panels of frame-panel buildings [Energoeffektivnye naruzhnye stenovye paneli karkasno-panel'nyh zdaniy]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. No. 6. Pp. 107–114. (rus)
14. Danel V.V. Solving the problem of vertical joints of external wall panels [Reshenie problemy vertikal'nyh stykov naruzhnyh stenovyh panelej]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2014. No. 3. Pp. 44–45. (rus)
15. Varlamova L.A., Rynkova M.V. Sealing of large-panel residential buildings [Germetizatsiya krupnopanel'nyh zhilyh domov]. Teoriya i praktika sovremennoj nauki: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk. Minsk: Navukova Svet, 2017. Pp. 20–26. (rus)

Information about the authors

Mavlyuberdinov, Azat R. PhD. E-mail: mazatr73@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1

Bogdanov, Ruslan R. PhD. E-mail: bogdanov.r.r@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1

Suleymanova Lyudmila A. DSc, Professor, Head of the Department of Construction and Municipal Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.10.2023

Для цитирования:

Мавлюбердинов А.Р., Богданов Р.Р., Сулейманова Л.А. К вопросу решения проблем эксплуатации панельных зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 46–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-46-53

For citation:

Mavlyuberdinov A.R., Bogdanov R.R., Suleymanova L.A. On the issue of solving the problem of operation of panel buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 46–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-46-53

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-54-63

Кущев Л.А., Уваров В.А., Крюков И.В., *Брежнев Д.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: danil_breznev@rambler.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА СО СПИРАЛЬНЫМ ЗМЕЕВИКОВОМ

Аннотация. В Российской Федерации жилищно-коммунальное хозяйство является одной из важнейших отраслей народного хозяйства. Для обеспечения потребителей теплом и поддержания в заданной температуре в системах отопления и горячего водоснабжения жилых и общественных зданий необходимо применение эффективных теплообменных аппаратов. При решении инженерных задач, направленных на совершенствование конструктивных особенностей теплообменных аппаратов, необходимо в первую очередь провести исследование теплотехнических характеристик применяемого оборудования. Это позволит выявить недостатки оборудования и предложить оригинальную конструкцию или рекомендации по совершенствованию определенных элементов. Это особенно важно при разработке теплообменных аппаратов, применяемых в жилищно-коммунальном хозяйстве топливно-энергетического комплекса РФ. В данной работе исследовались теплотехнические характеристики кожухотрубного теплообменного аппарата со спиральным змеевиком, определены параметры температуры на выходе из греющего и нагреваемого контуров, рассчитан коэффициент теплопередачи K , $[Wt/(m^2 \times ^\circ C)]$, при различных температурных режимах работы, был описан алгоритм проведения натурного эксперимента на лабораторной установке с пошаговым указанием выполненных действий. В выводах были проанализированы результаты экспериментальной работы над аппаратом, а также сформулировано предложение по созданию теплообменного аппарата локального производства.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, змеевик, турбулизация, коэффициент теплопередачи, натурный эксперимент.

Введение. Жилищно-коммунальное хозяйство является важной составной частью топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Рассматривая динамику процесса отпуски тепловой энергии (рис. 1), можно отметить, что наиболее энергоемкими являются центральный и приволжский федеральные округа. Далее следуют сибирский, северо-западный и уральский федеральные округа. Значительно меньшее

потребление тепловой энергии в дальневосточном, южном и северокавказском федеральных округах. Самое малое потребление тепловой энергии наблюдается в северокавказском федеральном округе. Общее потребление тепловой энергии в Российской Федерации за период 2021 года составляет 1341,9 млн. Гкал [1, 2].

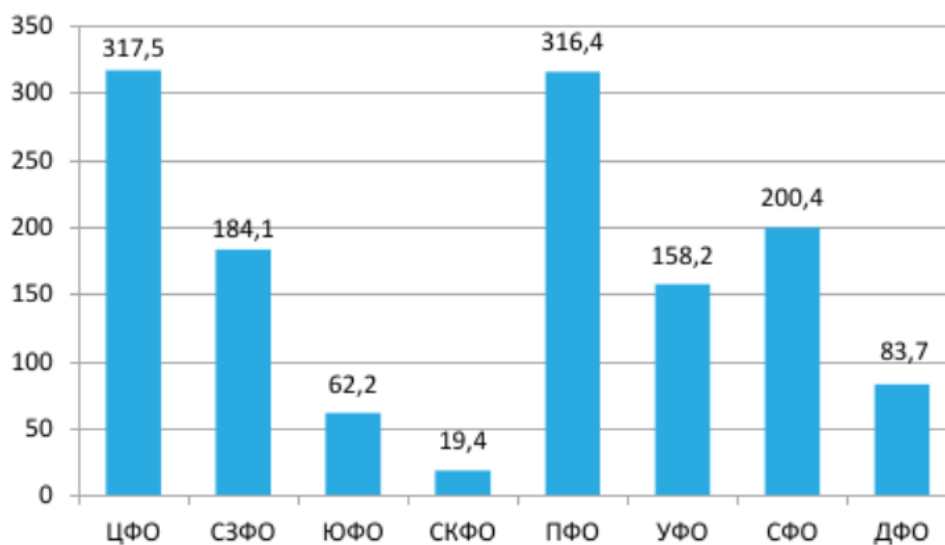


Рис. 1. Отпуск тепловой энергии по федеральным округам (без учета отпуски и потребления тепла от промышленных котельных) в 2021 г., млн Гкал

Отпуск тепловой энергии от источников тепла в системах централизованного теплоснабжения снизился за последние 17 лет на 147 млн. Гкал, что объясняется повышением эффективности работы теплогенерирующего оборудования: котельных, ТЭЦ, АТЭЦ, теплообменных агрегатов, снижение потерь тепла в инженерных сетях. Минимальное значение отпуска тепловой энергии зафиксировано в 2020 г. (1 221 млн Гкал).

Совершенствование способов отпуска тепла потребителям при минимальных затратах является важной стратегической задачей. В работе [4] рассмотрены этапы развития теплоэнергетики. На период с 2020 по 2050 гг. планируется переход к системе теплоснабжения четвертого поколения. Основными особенностями такой системы являются надёжная передача температуры горячего теплоносителя для систем отопления и горячего водоснабжения при низкой начальной температуре, сниженные потери тепловой энергии в тепловой сети, использование возобновляемых источников энергии, интегрированных в сеть теплоснабжения, использование интеллектуальной интегрированной энергетической системы [5]. Стоит отметить, что эффективная передача тепла для систем отопления и горячего водоснабжения жилищно-коммунального сектора невозможна без современных теплообменных аппаратов, обладающих высоким коэффициентом теплопередачи. Поэтому этот пункт также может быть отнесен к системам теплоснабжения четвертого поколения [6].

Основная часть. Теплообменные аппараты являются одним из основных видов технологического оборудования котельных, центральных тепловых пунктов (ЦТП), индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Назначение теплообменного аппарата – передача тепла от горячего теплоносителя, поступающего от теплогенерирующего оборудования или тепловых сетей, к нагреваемому, который используется для систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) [7].

Наибольшее применение в РФ получили кожухотрубные теплообменные аппараты. Однако данные аппараты обладают относительно невысоким коэффициентом теплопередачи по сравнению с пластинчатыми теплообменными аппаратами [8, 9]. Несмотря на высокую эффективность пластинчатых теплообменных аппаратов стоит отметить их основные недостатки:

- зарастание теплообменной поверхности пластины приводит к существенному снижению коэффициента теплопередачи;
- повреждение резиновых прокладок при разборке и чистке пластин теплообменного аппарата, что приводит к их быстрому износу и необходимости замены.

В условиях сильной загрязнённости теплоносителя пластинчатые теплообменные аппараты использовать нецелесообразно.

Для повышения эффективности работы, наиболее распространённого кожухотрубного теплообменного аппарата, разрабатываются кожухотрубные теплообменники со спиральным змеевиком. Это является актуальной задачей. Так применение гладкой трубы, изогнутой в виде спирали, позволяет увеличить теплоотдачу от греющего теплоносителя к стенке трубы до 1,5 раз [10–13].

Одним из примеров теплообменного аппарата со спиральным змеевиком является теплообменник фирмы Нехоніс (Польша). Высокая эффективность данного теплообменного аппарата обусловлена рифленой поверхностью трубок змеевика, что увеличивает турбулентность потока и повышает теплопередачу, а компактные размеры позволяют уменьшить пространство для его монтажа. Однако стоит отметить, что корпус данного аппарата цельный, без возможности его разборки. В этом случае замена змеевика или проведение очистки от накипи и загрязнений наружной поверхности змеевика невозможно без нарушения целостности корпуса аппарата [14, 15].

Одним из важных аспектов экспериментальных исследований является оценка эффективности работы теплообменника для разработки отечественного кожухотрубного змеевикового теплообменного аппарата. В работе приведены формулы расчета коэффициента теплопередачи; температурного напора; количество тепла, идущее на нагрев нагреваемого теплоносителя; количество теплоты, переданное от греющего теплоносителя нагреваемому контуру; общее количество тепла, поступающее от греющего теплоносителя нагреваемому контуру.

Для оценки эффективности работы данного теплообменного аппарата с целью разработки более совершенной отечественной конструкции, которая позволит в рамках импортозамещения производить собственное теплообменное оборудование, необходимо провести подробное изучение конструктивных особенностей, а также провести оценку теплотехнических характеристик [16, 17].

Методы исследований. Целью эксперимента является определение теплотехнических характеристик исследуемого кожухотрубного теплообменного аппарата фирмы Нехоніс со спиральным змеевиком. В результате эксперимента планируется получить значения температур на выходе из греющего и нагреваемого контуров, а также выполнить расчет коэффициента теплопередачи K , $[Вт/(м^2 \times ^\circ C)]$.

Основным параметром, характеризующим работу теплообменника, является коэффициент теплопередачи K . Расчет коэффициента теплопередачи K производился по формуле:

$$K = \frac{Q_{\text{сп}}}{F \cdot \Delta \bar{t}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сп}}$ – количество теплоты, переданное от греющего теплоносителя, Вт; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; $\Delta \bar{t}$ – температурный напор, который определяется в зависимости от направлений движения греющей и нагреваемой жидкостей по формуле для противоточного движения жидкостей:

$$\Delta \bar{t} = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{(t'_1 - t''_2)}{(t'_2 - t''_1)}}, \quad (2)$$

где t'_1 – температура греющего теплоносителя на входе в теплообменник, $^{\circ}\text{C}$; t'_2 – температура греющего теплоносителя на выходе из теплообменника, $^{\circ}\text{C}$; t''_1 – температура нагреваемой жидкости на входе в теплообменник, $^{\circ}\text{C}$; t''_2 – температура нагреваемой жидкости на выходе из теплообменника, $^{\circ}\text{C}$.

Количество теплоты, переданное от греющего теплоносителя, определяется косвенно по известному расходу теплоносителя в греющем контуре и разности температур на входе и выходе:

$$Q_{\text{сп}} = \frac{G_{\text{сп}} \times c \times (t'_1 - t'_2)}{3600}, \quad (3)$$

где $G_{\text{сп}}$ – массовый расход греющего теплоносителя, кг/ч ; c – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C})$; t'_1 – температура воды на входе в греющий контур, $^{\circ}\text{C}$; t'_2 – температура воды на выходе из греющего контура, $^{\circ}\text{C}$.

Количество тепла, идущее на нагрев нагреваемого теплоносителя, определялось по формуле:

$$Q_{\text{наг}} = \frac{G_{\text{наг}} \times c \times (t''_2 - t''_1)}{3600}, \quad (4)$$

где $G_{\text{наг}}$ – массовый расход нагреваемого теплоносителя, кг/ч ; c – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C})$; t''_1 – температура воды на входе в нагреваемый контур, $^{\circ}\text{C}$; t''_2 – температура воды на выходе из нагреваемого контура, $^{\circ}\text{C}$.

Так как в ходе эксперимента корпус теплообменника не имел тепловой изоляции, часть тепла терялась в окружающее пространство. Общее количество тепла, поступающее от греющего теплоносителя можно представить, как:

$$Q_{\text{сп}} = Q_{\text{наг}} + Q_{\text{тер}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{наг}}$ – количество тепла, идущее на нагрев жидкости, Вт; $Q_{\text{тер}}$ – количество тепла, теряемое в окружающую среду с поверхности теплообменного аппарата, Вт. Потерями тепла в окружающую среду в ходе эксперимента пренебрегали и расход тепла учитывался по греющему контуру.

Объектом исследования является кожухотрубный теплообменный аппарат со спиральным змеевиком. Схема исследуемого аппарата представлена (рис. 2).

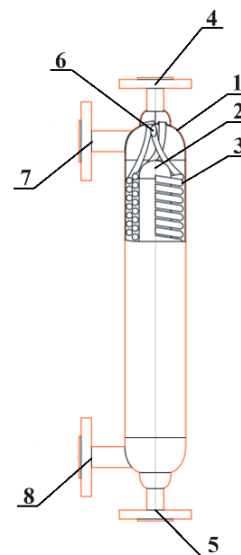


Рис. 2. Кожухотрубный теплообменный аппарат со змеевиком: 1 – цилиндрический кожух; 2 – вытеснитель; 3 – змеевик; 4, 5 – патрубки подвода теплоносителя греющего контура; 6 – каналы; 7, 8 – патрубки подвода теплоносителя нагреваемого контура

Основная часть. Исследуемый теплообменный аппарат состоит из цилиндрического кожуха 1, в полости которого расположен цилиндрический вытеснитель 2, и змеевик 3, представляющий спираль из трёх рифлёных, закрученных вокруг своей оси, труб, навитый вокруг вытеснителя. На внешней поверхности корпуса 1 расположены патрубки 4 и 5 для подачи и отвода греющего теплоносителя. Попадая в теплообменник через патрубок 4, горячий теплоноситель, через каналы 6 направляется в змеевик 3. Проходя через змеевик 3, греющий теплоноситель покидает его. Через патрубок 5 греющий теплоноситель удаляется из теплообменника. Патрубки 7 и 8 служат для подачи и отвода нагреваемого теплоносителя.

Высота аппарата: 585 мм; диаметр кожуха: 80 мм, диаметр трубок змеевика: 8 мм, толщина стенок: 0,6 мм; площадь поверхности змеевика: 0,3 м^2 ; масса теплообменника: 7,1 кг. Полученные геометрические характеристики соответствуют паспортному описанию и характеристикам аппарата.

При помощи камеры видеоскопа проводилось внутренне обследование полости греющего и нагреваемого контуров.

В полости дна корпуса греющего контура находятся три отверстия, через которые греющий теплоноситель попадает в трубки спирального змеевика. Внутренняя поверхность трубок имеет выпуклую скрученную поверхность. В полости нагреваемого контура находятся 3 трубки спирального змеевика, поверхность трубок скрученная, выпуклая. В середине корпуса по всей высоте нагреваемого контура расположен вытеснитель, имеющий в верхней и нижней части отверстие. Таким образом, нагреваемый теплоноситель не только омывает наружную поверхность вытеснителя, но еще и попадает в его внутреннее пространство. Трубки спирального змеевика расположены по всей высоте вытеснителя, местами соприкасаются наружными стенками.

Эксперимент проводился в специализированной лаборатории по изучению гидродинамических и теплообменных процессов на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Экспериментальная установка представлена на рисунке 2.

Экспериментальная установка состоит из следующих основных элементов: исследуемого теплообменного аппарата 2, электрического нагревателя 1, подающего насоса 3, тепловычислителя 4, отопительного прибора 5, расширительного бака 6, магнитных расходомеров 7, датчиков температуры 8 (рис. 6). Кроме этого, экспериментальная установка включает в себя пластиковые трубопроводы, гибкие металлические подводы, запорно-регулирующую арматуру, манометры.

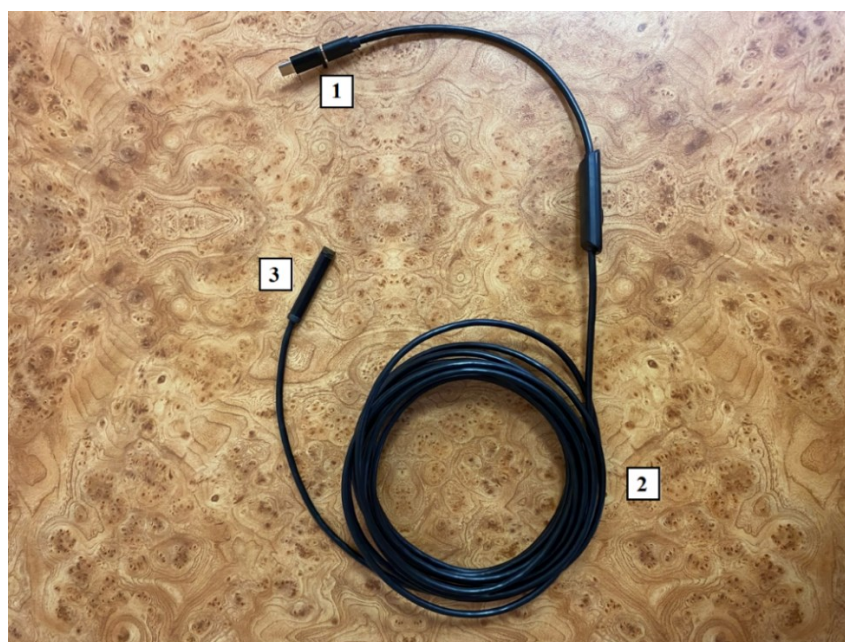


Рис. 3. Фотография видеоскопа: 1 – адаптер для подключения к смартфону, 2 – провод; 3 – камера со светодиодами



Рис. 4. Фото греющего контура



Рис. 5. Фото нагреваемого контура

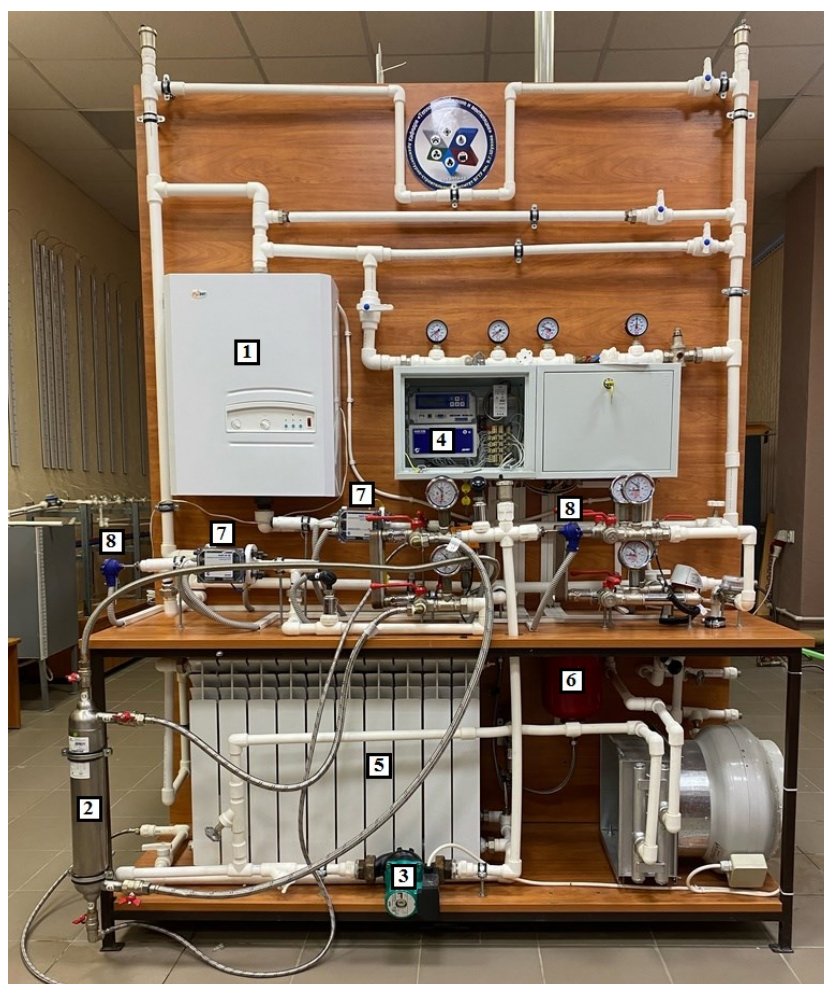


Рис. 6. Фотография экспериментальной установки

Алгоритм подготовки оборудования к проведению эксперимента включает в себя следующие этапы:

1. Включение электрического нагревателя, включение насоса греющего контура.

2. Выставление необходимых для эксперимента параметров температуры на электрическом нагревателе.

3. Нагрев греющего теплоносителя до необходимой температуры и снятие параметров с тепловычислителей.

4. По достижению заданной температуры, включается насос нагреваемого контура.

5. После запуска насоса нагреваемого контура снимаются показания теплосчетчика в течение 5 минут.

В ходе проведения эксперимента измерялись следующие параметры:

- температуры на входе и выходе в греющий контур;
- температуры на входе и выходе в нагреваемый контур;
- массовый расход воды в греющем контуре;
- массовый расход воды в нагреваемом контуре.

Полученные данные будут использоваться для расчета количества тепла, температурного напора и коэффициента теплопередачи.

Температуры теплоносителей в греющем и нагреваемом контуре измерялись посредством датчиков температуры Взлет ТПС Pt500 L70, а расходы теплоносителей измерялись при помощи электромагнитного расходомера Взлет ЭР ЛайтМ 440Л В. Значения указанных параметров фиксировались при помощи тепловычислителя Взлет ТСРВ-042.

Установка работает следующим образом. Теплоноситель греющего контура нагревается в электрическом котле до заданной температуры, движется по трубопроводу до участка с ультразвуковым расходомером, где снимаются показания о его температуре и расходе. После этого, горячий теплоноситель попадает в греющий контур теплообменного аппарата, где отдаёт свою тепловую энергию по мере продвижения через спиральный змеевик нагреваемому теплоносителю. Продвигаясь дальше по контуру, теплоносителя проходит через ультразвуковой расходомер, где фиксируются параметры температуры теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата, после чего возвращается на подогрев в электрический котел и цикл повторяется. Теплоноситель нагреваемого контура проходит в ультразвуковой расходомер, отображая температуру до совершения теплообмена, попадая в нагреваемый контур теплообменного аппарата, омывая трубки спирального змеевика, вследствие чего, нагреваясь, после чего, нагретый теплоноситель удаляется из теплообменника, проходя через расходомер-счётчик, установленный после теплообменника, завершая цикл, начиная новый.

В процессе проведения эксперимента данные о работе теплообменного аппарата выводятся на программный компонент тепловычислителя, которые снимаются для дальнейшей численной обработки и получения сведений о работе теплообменного аппарата.

Массовый расход греющего и нагреваемого теплоносителя в ходе эксперимента составлял в среднем 220 и 700 кг/ч соответственно. Изменение температуры теплоносителей при проведении эксперимента объясняется остыванием жидкости и выходом теплообменного аппарата на рабочий режим работы, так как при эксплуатации систем отопления с учетом дополнительных тепlopоступлений в отапливаемое помещение влияет на тепlopотери помещения. Стоит отметить, что эксперимент проводился в помещении с постоянной температурой равной 23 °С.

При температуре 85 °С, установленной на котле диапазон изменения температуры греющего теплоносителя на входе греющего контура 74–85 °С; температура греющего теплоносителя на выходе 60–67 °С; температура нагреваемого теплоносителя на выходе 39–63 °С; величина коэффициента теплообмена меняется в диапазоне 381–3200 Вт/(м²×°С). Наблюдается рост величины K .

При температуре на котле 75 °С так же наблюдается рост величины K , однако при этой температуре коэффициент не превышает отметки 2200 Вт/(м²×°С).

На диаграмме (рис. 7) показана зависимость коэффициента теплообмена от температуры нагреваемого теплоносителя на выходе из кожуха теплообменного аппарата в диапазоне 40–65°С.

Выводы. В результате натурного эксперимента исследованы теплотехнические характеристики кожухотрубного змеевикового теплообменника. Установлено, что в диапазоне температуры 55–65 °С величина коэффициента теплопередачи составляет в среднем около 2700 Вт/(м²×°С).

При увеличении температуры греющего контура до 65 °С наблюдается рост коэффициента теплопередачи K . Исследования проводились при температурах 75 °С и 85 °С для греющего контура.

В ходе проведения экспериментальных исследований был получен патент на кожухотрубный змеевиковый теплообменник с измененным способом подачи нагреваемого теплоносителя.

В процессе импортозамещения для разработки современного, отечественного теплообменного оборудования целесообразно использовать эффект турбулизации нагреваемого теплоносителя. Это позволит интенсифицировать процесс передачи тепла от греющего контура теплоносителя к нагреваемому у пристеночных слоёв впусков теплоносителя внутри контуров, избегая повышения местных гидравлических сопротивлений.

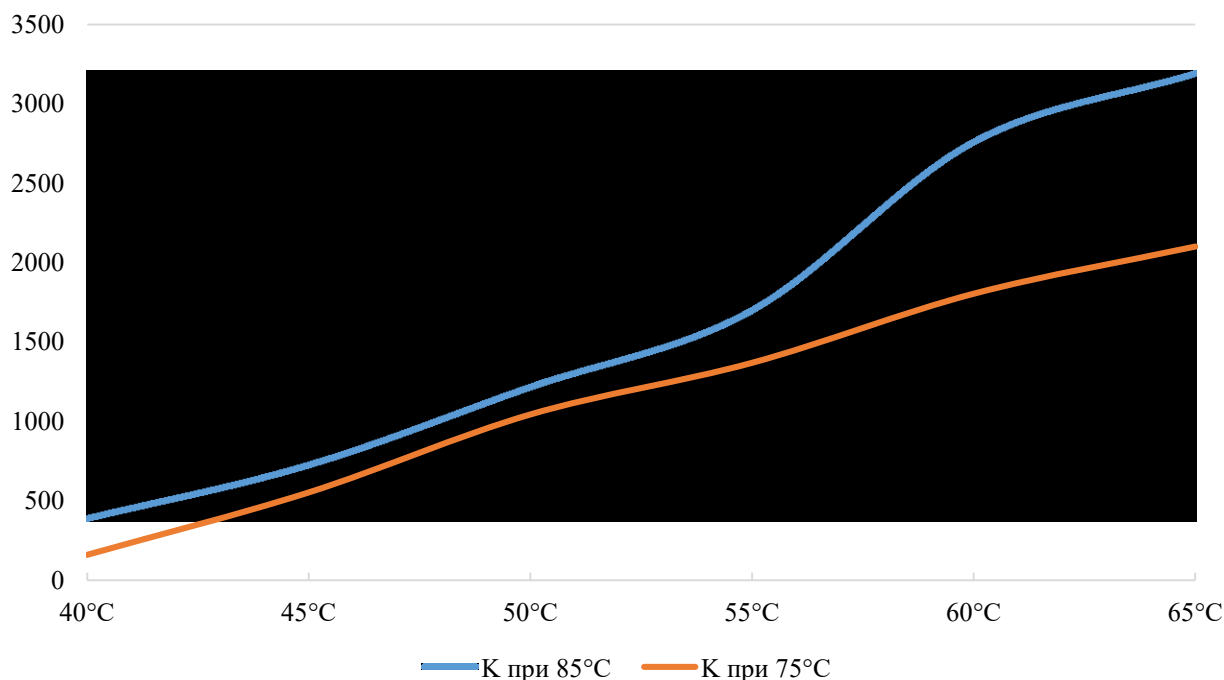


Рис. 7. Диаграмма зависимости коэффициента теплопередачи K от температуры греющего контура

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отчет Министерства энергетики РФ «О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2021 году»: официальный сайт. Москва. Обновляется в течение суток. — URL: <https://minenergo.gov.ru/node/24393> (дата обращения: 25.08.2023)

2. Теплоснабжение населенных пунктов // Федеральная служба государственной статистики, 2022. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jkh3.docx> (дата обращения 25.08.2023).

3. Энхжаргал Х., Намхайням Б., Батмэнд Л., Баярсайхан Г., Лхамсурэн Г. Тенденции развития систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2023. № 1(232). С. 16–25.

4. Якшин С.С., Саввин Н.Ю., Куцев Л.А. Современные способы повышения эффективности работы отопительных приборов в ЖКХ // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых, Курск, 01 декабря 2020 года / сборник научных статей Всероссийской научной конференции перспективных разработок, в 2-х томах. Том 2. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 304–307.

5. Липин А.А., Романенко Ю.Е., Шибашов А.В., Липин А.Г. Расчет теплообменных аппаратов. Кожухотрубчатые теплообменники : учебное пособие. Иваново : ИГХТУ, 2017. 76 с.

6. Брежнев Д.А., Саввин Н.Ю., Бычкова Н.Д. Способы интенсификации тепловых процессов в спиральных теплообменниках // Наука.

Технологии. Инновации: Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 11-ти частях, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 года. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. С. 179–182.

7. Sultan K.F., Hamad K.A. Intensification of heat transfer and flow in heat exchanger with shell and helically coiled tube by using nano fluids // IJESRT Journal. 2015. Vol. 4(1). Pp. 446–460.

8. Кустов Б.О., Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Герасимчук М.В., Захаров К.Д. Экспериментальные исследования перспективных способов интенсификации теплопередачи в трубчатом теплообменнике // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. №. 3. С. 174–183.

9. Nellis G., Klein S. Heat transfer. Cambridge university press, 2008. 1091 p.

10. Bejan A., Kraus A.D. (ed.). Heat transfer handbook. John Wiley & Sons, 2003. Vol.1. 1480 p.

11. Куцев Л.А., Никулин Н. Ю. Повышение эффективности работы кожухотрубного теплообменного аппарата // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2015. №. 5. С. 284–287.

12. Hewitt G.F., Shires G.L., Bott T. Process heat transfer. Begell House, 1994. 1042 p.

13. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 497 с.

14. Cengel A. Heat transfer. New York: McGraw-Hill, 2003. 907 p.

15. Новикова А.Н., Галковский В.А. Сравнительный анализ применения теплообменных

аппаратов на центральных тепловых пунктах // Вестник евразийской науки. 2016. Т. 8. №. 6 (37). С. 98.

16. Mills A.F. Heat transfer. CRC Press, 1992. 888 p.

17. Cervenka B., Holubcik M., Drga J., Malcho M. Modular Spiral Heat Exchanger Thermal Modelling // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (12). 5805 p.

18. Савельев Н.И., Лукин П.М. Расчет и проектирование кожухотрубчатых теплообменных аппаратов // Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2010. 79 с.

Информация об авторах

Кушев Леонид Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: leonidkushev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: isi@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Крюков Илья Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: iliya.krakov@yandex.ru, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Брежнев Даниил Александрович, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: danil_breznev@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.09.2023 г.

© Кушев Л.А., Уваров В.А., Крюков И.В., Брежнев Д.А., 2023

Kushchev L.A., Uvarov V.A., Kryukov I.V., *Brezhnev D.A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: danil_breznev@rambler.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TECHNICAL PARAMETERS OF A SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER WITH A SPIRAL COIL

Abstract. In the Russian Federation, housing and communal services are one of the sectors of the national economy. To provide consumers with heat and maintain a given temperature in conditions of constant heating and hot water supply of residential and public buildings, it is necessary to use heat exchangers. When solving engineering problems aimed at improving the design features of heat exchangers, it is necessary first of all to conduct a study of the thermal characteristics of the equipment used. This will allow you to identify equipment shortcomings and offer original lighting or recommendations for improving some elements. This is especially important when developing heat exchangers used in the housing and communal services of the fuel and energy complex of the Russian Federation. In this work, the thermal characteristics of a condenser heat exchanger with a spiral coil, controlled temperature parameters at the outlet of the heating and heated circuits were studied, the heat transfer coefficient K , $[W/(m^2 \times ^\circ C)]$, was calculated at various operating temperature conditions, and an algorithm for carrying out a natural experiment in a laboratory setup with a step-by-step description of the actions performed. The conclusions analyzed the results of experimental work on the apparatus, and also formulated proposals for the creation of a locally produced heat exchanger.

Keywords: heat exchanger, coil, turbulence, heat transfer coefficient, field experiment.

REFERENCES

1. Report of the Ministry of Energy of the Russian Federation "On the state of thermal power and district heating in the Russian Federation in 2021":

official website. Moscow. Updated during the day [Otchet Ministerstva energetiki RF «O sostoyanii teploenergetiki i centralizovannogo teplosnabzheniya v Rossiiskoi Federacii v 2021 godu» official site. Moscow. Updated throughout the day]. URL:

<https://minenergo.gov.ru/node/24393> (date of access: 25.08.2023) (rus)

2. Heat supply of settlements. Federal State Statistics Service, 2022. [Teplosnabzhenie nase-lennykh punktov] URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jkh3.docx> (date of access: 25.08.2023) (rus)

3. Enkhzhargal H., Namhainyam B., Batmand L., Bayarsaikhan G., Lkhamsuren G. Trends in the development of heat supply systems [Tendencii razvitiya sistem teplosnabzheniya]. News of heat supply. 2023. No. 1(232). Pp. 16–25. (rus)

4. Yakshin S.S., Savvin N.Yu., Kushchev L.A. Modern ways to improve the efficiency of heating appliances in housing and communal services [Sovremennye sposoby povysheniya effektivnosti raboty otopitel'nykh priborov v ZHKKH]. Innovative potential of society development: the view of young scientists, Kursk, December 01, 2020. Collection of scientific articles of the All-Russian Scientific Conference of promising developments, in 2 volumes. Volume 2. Kursk: Southwest State University, 2020. Pp. 304–307. (rus)

5. Lipin A.A., Romanenko Yu.E., Shibashov A.V., Lipin A.G. Calculation of heat exchangers [Raschet teploobmennyykh apparatov]. Shell-and-tube heat exchangers: a textbook. Ivanovo: IHTU, 2017. 76 p. (rus)

6. Brezhnev D.A., Savvin N.Yu., Bychkova N.D. Methods of intensification of thermal processes in spiral heat exchangers [Sposoby intensivatsii teplovykh processov v spiral'nykh teploobmennikah]. Science. Technologies. Innovations: Collection of scientific papers of the XVI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists. In 11 parts, Novosibirsk, 05-08 December 2022. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2022. Pp. 179–182. (rus)

7. Sultan K.F., Hamad K.A. Intensification of heat transfer and flow in heat exchanger with shell and helically coiled tube by using nano fluids. IJESRT Journal. 2015. Vol. 4(1). Pp. 446–460.

8. Kustov B.O., Balchugov A.V., Badenikov A.V., Gerasimchuk M.V., Zakharov K.D. Experimental studies of promising methods of heat transfer

intensification in a tubular heat exchanger [Eksperimental'nye issledovaniya perspektivnykh sposobov intensivatsii teploperedachi v trubchatom teploobmennike]. Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2020. Vol. 331. No. 3. Pp. 174–183. (rus)

9. Nellis G., Klein S. Heat transfer. Cambridge university press, 2008. 1091 p.

10. Bejan A., Kraus A. D. (ed.). Heat transfer handbook. John Wiley & Sons, 2003. Vol.1. 1480 p.

11. Kushchev L.A., Nikulin N. Yu. Improving the efficiency of the shell-and-tube heat exchanger [Povyshenie effektivnosti raboty kozhuhotrubnogo teploobmennogo apparata]. Resource- and energy-efficient technologies in the construction complex of the region. 2015. No. 5. Pp. 284–287. (rus)

12. Hewitt G.F., Shires G.L., Bott T. Process heat transfer. Begell House, 1994. 1042 p.

13. Nashchokin V.V. Technical thermodynamics and heat transfer [Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha]. Moscow: Higher School, 1975. 497 p. (rus)

14. Cengel A. Heat transfer. New York: McGraw-Hill, 2003. 907 p.

15. Novikova A.N., Galkovsky V.A. Comparative analysis of the use of heat exchangers at central heating points [Sravnitel'nyy analiz primeneniya teploobmennyykh apparatov na central'nykh teplovykh punktah]. Bulletin of Eurasian Science. 2016. Vol. 8. No. 6 (37). p. 98. (rus)

16. Mills A.F. Heat transfer. CRC Press, 1992. 888 p.

17. Cervenka B., Holubcik M., Drga J., Malcho M. Modular Spiral Heat Exchanger Thermal Modelling. Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (12). 5805 p.

18. Savelyev N.I., Lukin P.M. Calculation and design of shell-and-tube heat exchangers [Raschet i proektirovanie kozhuhotrubchatykh teploobmennyykh apparatov]. Cheboksary: Chuvash Publishing House. un-ta. 2010. 79 p. (rus)

19. Kushchev L.A., Uvarov V.A., Brezhnev D.A., Savvin N.Yu., Alifanova A.I., Kryukov I.V., Arkhipova N.A., Tkachev A.V. Shell-and-tube coil heat exchanger. Patent RF, no. 2023118447, 2023.

Information about the authors

Kushchev, Leonid A. DSc, Professor. E-mail: leonidkushev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Uvarov, Valery A. DSc, Professor. E-mail: isi@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kryukov, Ilya V. Ph.D, Docent. E-mail: iliya.kryukov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Brezhnev, Daniil A. Postgraduate student. E-mail: daniil_breznev@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.09.2023

Для цитирования:

Кущев Л.А., Уваров В.А., Крюков И.В., Брежнев Д.А. Экспериментальное исследование теплотехнических параметров кожухотрубного теплообменного аппарата со спиральным змеевиком // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 54–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-54-63

For citation:

Kushchev L.A., Uvarov V.A., Kryukov I.V., Brezhnev D.A. Experimental study of heat technical parameters of a shell and tube heat exchanger with a spiral coil. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 54–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-54-63

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-64-72

Соколова Н.В., Ухабин В.В.Пензенский государственный университет архитектуры и строительства***E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru*

ВЫСОТНЫЙ РЕГЛАМЕНТ ДЛЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРОДА ПЕНЗЫ

Аннотация. Исторический центр города является главным хранителем культурного кода города, так как в его границах сконцентрированы важнейшие историко-культурные объекты, сохранена историческая среда. Сегодня в результате архитектурно-градостроительных преобразований здесь появляется высотная застройка. В результате происходит композиционное разрушение исторической среды, искажение и пространственное разрушение сложившихся исторических ансамблей. Город Пенза не является исключением: утрачены десятки исторических зданий, а их место заняли строения большего масштаба и высоты, разрушающие историческую среду. Проблема регулирования высоты новой застройки в исторической среде города Пензы обрела максимально острый характер и требует своего решения. Целью исследования является разработка высотного регламента для исторического центра города Пензы. Исследование основывается на изучении проблем регулирования высотности застройки в исторических центрах городов в России и за рубежом, анализе научных работ и законодательной базы РФ и города Пензы в области регулирования высотности, систематизации отечественного и зарубежного опыта в вопросах формирования и регулирования ограничений высотности в исторических центрах городов, натурном обследовании города, ретроспективном и ландшафтно-визуальном анализе, графическом моделировании. В результате проведенного исследования были получены положительные результаты: предложенная методика в результате апробации подтвердила свою эффективность, позволила выявить ландшафтно-визуальные особенности исторического центра города Пензы и сформировать ограничения высотности в границах исторического центра города, была сформирована структура и содержание высотного регламента застройки исторического центра города, рассмотрены варианты интеграции высотного регламента в градостроительную документацию муниципального уровня.

Ключевые слова: исторический центр, высотный регламент, ландшафтно-визуальный анализ.

Введение. Исторический центр города является главным хранителем культурного кода города, так как в его границах сконцентрированы важнейшие историко-культурные объекты, сохранена историко-архитектурная среда. Сегодня под натиском урбанизационных процессов историческая застройка подвергается агрессивному воздействию со стороны застройщиков, стремящихся извлечь максимальную выгоду с каждого квадратного метра дорогого земельного участка. В результате архитектурно-градостроительных преобразований в исторических центрах городов появляется высотная застройка. Это приводит к радикальным изменениям исторически сложившихся морфотипов застройки, искажению и пространственному разрушению исторических ансамблей, панорам, видовых раскрытий, а также другим архитектурно-градостроительным и социальным последствиям. Очевидно, что сохранение аутентичности и масштаба сложившейся застройки исторического центра города, а также его панорамного восприятия невозможно без регулирования этажности новостроек. Однако эта задача в современных реалиях практически не решается.

Город Пенза не является исключением. Основанный в 1663 году как крепость, город ак-

тивно развивался. Общая планировочная структура центра города Пензы была заложена регулярным планом 1785 г. В результате многочисленных пожаров застройка города неоднократно уничтожалась и обрела свой конечный вид лишь во второй половине 19 в. В конце 20 в. со сменой политического строя и переходом к рыночной экономике возник конфликт интересов и активное противостояние новой застройки и старой, особенно в историческом центре. Началось вытеснение исторической застройки и замещение ее строениями большего масштаба и высоты, разрушающими историческую среду. Ослабившийся контроль со стороны государства за объектами культурного наследия (ОКН) способствовал этому. Эти процессы повлекли за собой серьезные утраты как среди памятников истории, культуры и архитектуры, так и среди фоновой исторической застройки. В этот период была практически утрачена деревянная застройка центральной части города. Процессы деградации исторической среды продолжаются. Проблема регулирования высоты новой застройки в исторической среде города Пензы обрела максимально острый характер и требует своего решения.

Изучением восприятия архитектурных объектов занимались много исследователей 19-20

вв., как с позиций экспериментальной психологии (Г. Фехнер, В. Гельмгольц и др.), так и с позиций теории архитектуры и градостроительства (Е.Л. Беляева, П.Д. Спрейреджин, Х. Мертенс, Г.И. Покровский и многие др.) [1]. Для выявления особенностей применения ландшафтно-визуального анализа при решении задач охраны объектов культурного наследия и исторических центров городов были изучены работы Е.Л. Беляевой, В.Р. Крогуса, В.Н. Белоусова и Л.Н. Кулаги [2–4]; рассмотрены методики, описанные С.К. Регамэ, О.И. Пруцыным, Б.Е. Сотниковым, Т.В. Вавилонской [5–8]. Наиболее информативными для данной работы из зарубежных источников стали работы, посвящённые Лондону [9–11]; Нью-Йорку, Ванкуверу и др. [12–16]. Вместе с тем следует отметить, что проблема регулирования высотности застройки в исторических центрах российских городов требует дальнейшего изучения, а для города Пензы эта тема никогда не исследовалась.

Объектом исследования является градостроительное регулирование высотности застройки исторического центра города на основе ландшафтно-визуального анализа, а предметом исследования – высотный регламент как инструмент регулирования застройки в историческом центре города Пензы.

Цель исследования – разработка высотного регламента для исторического центра города Пензы.

Методика исследования. Методика исследования основывается на изучении проблем регулирования высотности застройки в исторических центрах городов в России и за рубежом, анализе научных работ и законодательной базы РФ и города Пензы в области регулирования высотности, систематизации отечественного и зарубежного опыта в вопросах формирования и регулирования ограничений высотности в исторических центрах городов, натурном обследовании, ретроспективном и ландшафтно-визуальном анализе, графическом моделировании.

Систематизация основных приёмов и инструментов проведения ландшафтно-визуального анализа для различных целей и в различных градостроительных и природно-топографических условиях позволила сформировать «комплексную методику выявления границ высотности новой застройки в историческом центре крупного города на основе ландшафтно-визуального анализа» (далее «комплексная методика»), которая состоит из трех этапов: предварительного, основного и заключительного:

- на предварительном этапе проводятся историко-архивные и библиографические исследова-

ния, натурные исследования, определяются границы исторического центра города, разрабатывается историко-архитектурный опорный план, выявляются точки и линии наблюдения наиболее презентабельных панорам и видов на исторический центр;

- во время основного этапа выполняются три основных шага по определению ограничений высотности застройки: 1 – определение ограничений высотности застройки на основе доминант (архиважных доминант (при презентабельном и фрагментарном восприятии) и маяков-ориентиров); 2 – определение ограничений высотности застройки на основе поквартального исследования; 3 – определение ограничений высотности застройки на основе панорамного восприятия;

- на заключительном этапе создается высотный регламент, регулирующий высоту новой застройки в историческом центре города в виде карты и текстового документа [17].

Результаты исследования. Предложенная методика была апробирована в 2021–2022 гг. в условиях исторического центра города Пензы. Для начала практического исследования на основе ретроспективного анализа исторических планов города были выявлены границы исторического центра города Пензы, являющиеся границами исследования; был сформирован историко-архитектурный опорный план. В качестве основных объектов, формирующих историческую среду центральной части города Пензы приняты объекты культурного наследия, вновь выявленные объекты культурного наследия и объекты, обладающие признаками объектов культурного наследия.

С целью выявления границ исторического центра города Пензы был проведён ретроспективный анализ планов и схем различных исторических периодов. Исторические карты были приведены в единый масштаб, детально сопоставлены и наложены друг на друга. Изучение планов 1663, 1735, 1785, 1802, 1876, 1893 и 1927 годов позволило отследить тенденции развития планировочной структуры, а также этапы градостроительных преобразований. В итоге были выявлены границы исторического центра города Пензы - территория, ограниченная железнодорожными путями на севере, улицами Кулакова, Космодемьянской, Боевая гора, Маршала Крылова на западе, Свердлова, Тамбовская и Красная горка на юге и рекой Сурой на востоке. Территория включает в себя 65 кварталов, 44 из которых обладают ценными историко-архитектурными объектами. В границах исследования находится 102 объекта культурного наследия, из них 92 – ОКН регионального значения и 10 – ОКН феде-

рального значения, а также 150 объектов, являющихся ценной исторической застройкой и обладающих признаками ОКН.

В ходе натурного обследования были выявлены самые презентабельные панорамы города и точки их восприятия. В качестве основных охраняемых панорам и видов города установлены: «Панорама исторического центра города с Бакунинского моста», «Панорама исторического центра города с правого берега реки», «Панорама исторического центра города с моста Дружбы», «Панорама исторического центра города с моста В.П. Капашина», «Панорама исторического центра города с Казанского моста», «Панорама исторического центра города со Свердловского моста», «Панорама речной долины со смотровой площадки у памятника Первопоселенцу» и др. Следует отметить, что точки и линии наблюдения панорам выбирались только в социально доступных общественных пространствах города на расстоянии не дальше 3000 м от объекта наблюдения.

По итогам натурных исследований и анализа панорам исторического центра города были выявлены диссонирующие объекты: жилые здания повышенной этажности по адресам ул. М. Горького 54, ул. Урицкого 62, ул. Урицкого 14, ул. Урицкого 16, ул. Урицкого 18, ул. Красная 49, ул. Богданова 14, ул. Калинина 4, ул. Московская 4Б, ул. Кирова 15В, жилые комплексы «Триумф» и «Клубный дом на набережной».

В ходе натурных исследований была выявлена архиважная архитектурно-градостроительная высотная доминанта исторического центра города Пензы - Спасский Кафедральный собор, а также четыре маяка-ориентира: Духосошественский храм и Троицкий собор Троицкого женского монастыря, Храм Преображения Господня Спасо-Преображенского мужского монастыря и Покровский архиерейский собор. Были выявлены точки видимости данных объектов. Из данных точек построены коридоры видимости и коридоры регулирования. Далее были выстроены фронтальные сечения и векторы видимости, направленные на видимые части доминант из выявленных точек. В соответствии с графическим построением фронтальных сечений коридоров регулирования в зонах их влияния были определены предварительные высотные ограничения в цифровых значениях. Они составили от 31 до 23 м, от 16 до 13 м, от 11 до 9 м, в зависимости от приближения к доминантам и изменений рельефа. Таким образом, были определены ограничения высотности застройки на основе доминант: архиважных доминант (при презентабельном и

фрагментарном восприятии) и маяков-ориентиров.

В ходе натурных исследований так же были выявлены средние габариты исторической застройки центральной части города Пензы, исходя из которых, была определена глубина квартальных поясов, были выявлены точки видимости, направленные на каждый отдельный ОКН и другие объекты ценной исторической застройки. Из данных точек были построены коридоры видимости. Далее были выстроены фронтальные сечения и векторы видимости, направленные на выходящие точки (конёк крыши, карниз), обследуемого архитектурного объекта из выявленных точек. В соответствии с графическим построением фронтальных сечений коридоров видимости в зонах их влияния были определены предварительные высотные ограничения в цифровых значениях. Они составили от 3 до 18 м в периметральной застройке и от 9 до 47 м во внутриквартальной застройке, в зависимости от особенностей рельефа и габаритов существующей ценной исторической застройки. Исследование было проведено для всего исторического центра города Пензы в ранее установленных границах. На рисунке 1 в качестве примера приведены исследования по кварталу 41 (ул. Кураева, ул. Московская, ул. К. Маркса, ул. Володарского) и кварталу 42 (ул. Кураева, ул. Кирова, ул. К. Маркса, ул. Московская).

По результатам первых двух этапов была сформирована предварительная схема ограничений высотности. Затем была создана 3D-модель исторического центра города Пензы. На свободных территориях, а также на территориях с ветхой/не имеющей исторической ценности/подлежащей потенциальной реконструкции застройки были размещены условные модели возможных зданий, высота которых соответствует высоте, указанной в предварительной схеме высотных ограничений. Был проведён визуальный анализ созданной в 3D-пространстве застройки. «Новая застройка», не вызывающая диссонанса в восприятии панорам и «открыточных» раскрытий улиц, сохранила установленные значения. «Новая застройка», габариты которой послужили визуальному дисбалансу исторического пространства, пошагово уменьшалась до получения визуальной гармонии (рис. 2). Цифровые значения высотности моделей стали окончательными при выявлении высотных ограничений в историческом центре города Пензы. Итоговые значения составили от 3 до 18 м в периметральной застройке и от 9 до 23 м во внутриквартальной застройке, от 12 до 18 м в прибрежных зонах, до 33 м в периферийных зонах исторического центра.

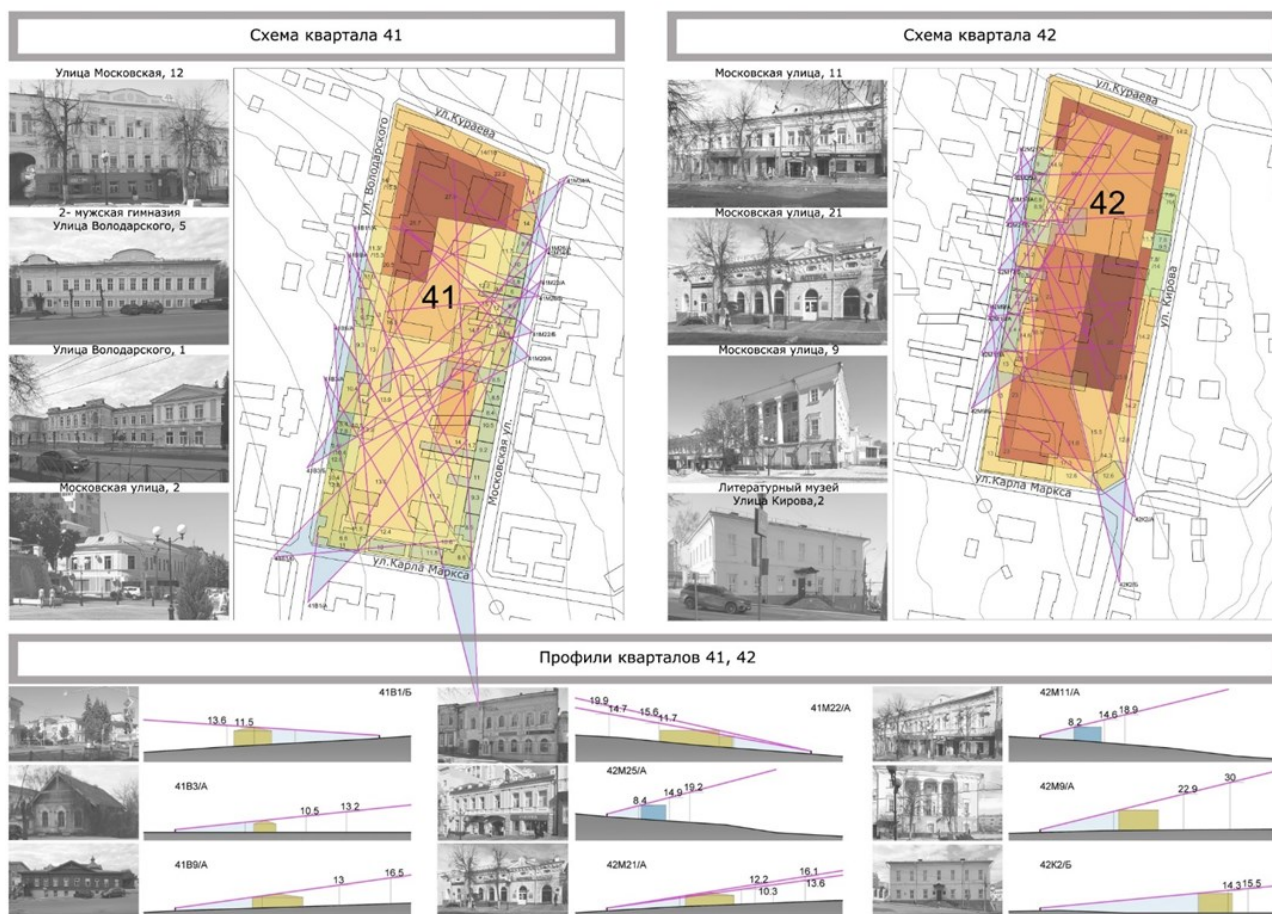


Рис. 1. Определение ограничений высотности застройки на основе поквартального исследования исторического центра города Пензы. Разраб. Ухабин В.В., Соколова Н.В., 2022 г.



Рис. 2. Определение ограничений высотности застройки на основе панорамного восприятия исторического центра города Пензы: серый – существующая застройка; желтый – «новая застройка». Разраб. Ухабин В.В., Соколова Н.В., 2022 г.

По завершении трёх этапов по определению ограничений высотности был сформирован «Высотный регламент застройки исторического центра города Пензы» (далее «Высотный регламент»). Проект Высотного регламента представляет собой документ в текстовой форме и в виде

карты («Схема ограничений высотности в историческом центре города Пензы» – Схема) (рис. 3). Тестовая часть содержит требования к предельным параметрам ограничений высотности на территории исторического центра города Пензы, правила пользования и рекомендации, включаю-

щие приёмы маскировки существующих диссоциирующих объектов. «Схема ограничений высотности в историческом центре города Пензы» представляет собой план исторического центра города Пензы, в фиксированных границах. Каждый квартал дифференцирован на высотные зоны, предельные высотные параметры которых составляют от 3 м до 33 м. Разность ограничений высотности отражает цветовая дифференциация от тёмно-зелёного до тёмно-коричневого соответственно.

Целью Высотного регламента является сохранение исторических панорам и видов города, недопущение строительства новых объектов, разрушающих и вступающих в диссонанс с исторической застройкой, поддержание средовых характеристик исторического центра города. В отношении земельных участков и объектов капитального строительства применяются градостроительные регламенты, установленные для соответствующей территориальной зоны, а также предельные параметры в соответствии со Схемой. Максимальная высота зданий, строений, сооружений установлена регламентом с учетом визуального восприятия ОКН, основных доминант: Спасского Кафедрального собора, Духовной церкви Троицкого монастыря, Троицкой церкви Троицкого монастыря, Спасо-Преображенского монастыря и Покровского собора; презентабельных панорам исторического центра Пензы; а также в соответствии с изменениями рельефа и ограничениями векторов видимости. Особое внимание следует обратить на то, что существующие объекты, нарушающие Регламент и вносящие диссонанс в историческую среду города, должны быть подвергнуты анализу и в дальнейшем трансформации и маскировке их негативного влияния. Основные приемы маскировки диссоциирующих объектов могут быть подобраны индивидуально, например, создание многоплановости с помощью высадки деревьев или террасирования, создание резкого цветового контраста фасада, создание фасада «невидимки», создание многоярусного фасада и др.

Высотный регламент застройки исторического центра города Пензы должен занять свое место в структуре градостроительных документов муниципального уровня. В соответствии с действующим законодательством в целях обеспечения сохранности ОКН в его исторической среде на сопряженной с ним территории устанавливаются зоны охраны объекта культурного наследия. В целях одновременного обеспечения сохранности нескольких объектов культурного наследия в их исторической среде допускается установление для данных объектов культурного

наследия объединенной зоны охраны ОКН. В целях сохранения исторической среды населенного пункта для него может быть установлен статус исторического поселения, определен предмет охраны исторического поселения, границы территории исторического поселения и требования к градостроительным регламентам в указанных границах. Для города Пензы возможны следующие варианты применения высотного регламента:

- в случае утверждения исторического центра города Пензы в статусе исторического поселения регионального значения, будут установлены требования к градостроительным регламентам и высотные ограничения станут их частью;

- в случае утверждения объединённой охранной зоны в историческом центре города Пензы, будут установлены требования к градостроительным регламентам в границах объединенной зоны охраны объектов культурного наследия: единой охранной зоны объектов культурного наследия, единой зоны регулирования застройки и хозяйственной деятельности и единой зоны охраняемого природного ландшафта, - и высотные ограничения станут их частью.

В случае одновременного применения двух видов документов, как, например, в Санкт-Петербурге, высотный регламент может стать единой основой для регламентов обоих документов.

В настоящее время в Пензе подобные документы отсутствуют, поэтому рекомендуется рассматривать Высотный регламент, как часть Правил землепользования и застройки г. Пензы или утвердить на муниципальном уровне в качестве самостоятельного документа, предварительно определив его статус в рамках региональных и муниципальных правовых актов. При вступлении Высотного регламента в юридическую силу, город получит надёжный механизм для сохранения аутентичности историко-культурного наследия и исторической среды центральной части города Пензы.

Выводы. В результате проведённого исследования, направленного на разработку высотного регламента застройки исторического центра Пензы и апробацию «комплексной методики», были получены положительные результаты:

1. Предложенная методика позволила выявить ландшафтно-визуальные особенности исторического центра города Пензы и сформировать ограничения высотности в границах исторического центра города Пензы - территория каждого отдельного квартала была разбита на зоны с определёнными числовыми значениями предельных параметров высотности возводимых и реконструируемых зданий, строений и сооружений. Дифференциация ограничений высотности

аргументирована наличием и количеством объектов культурного наследия на различных территориях, габаритами данных объектов, сценариями их визуальных раскрытий, необходимостью сохранения природного ландшафта исторического

центра города Пензы и подчёркивания природного рельефа, а также местонахождением в структуре центра города центральным или периферийным.

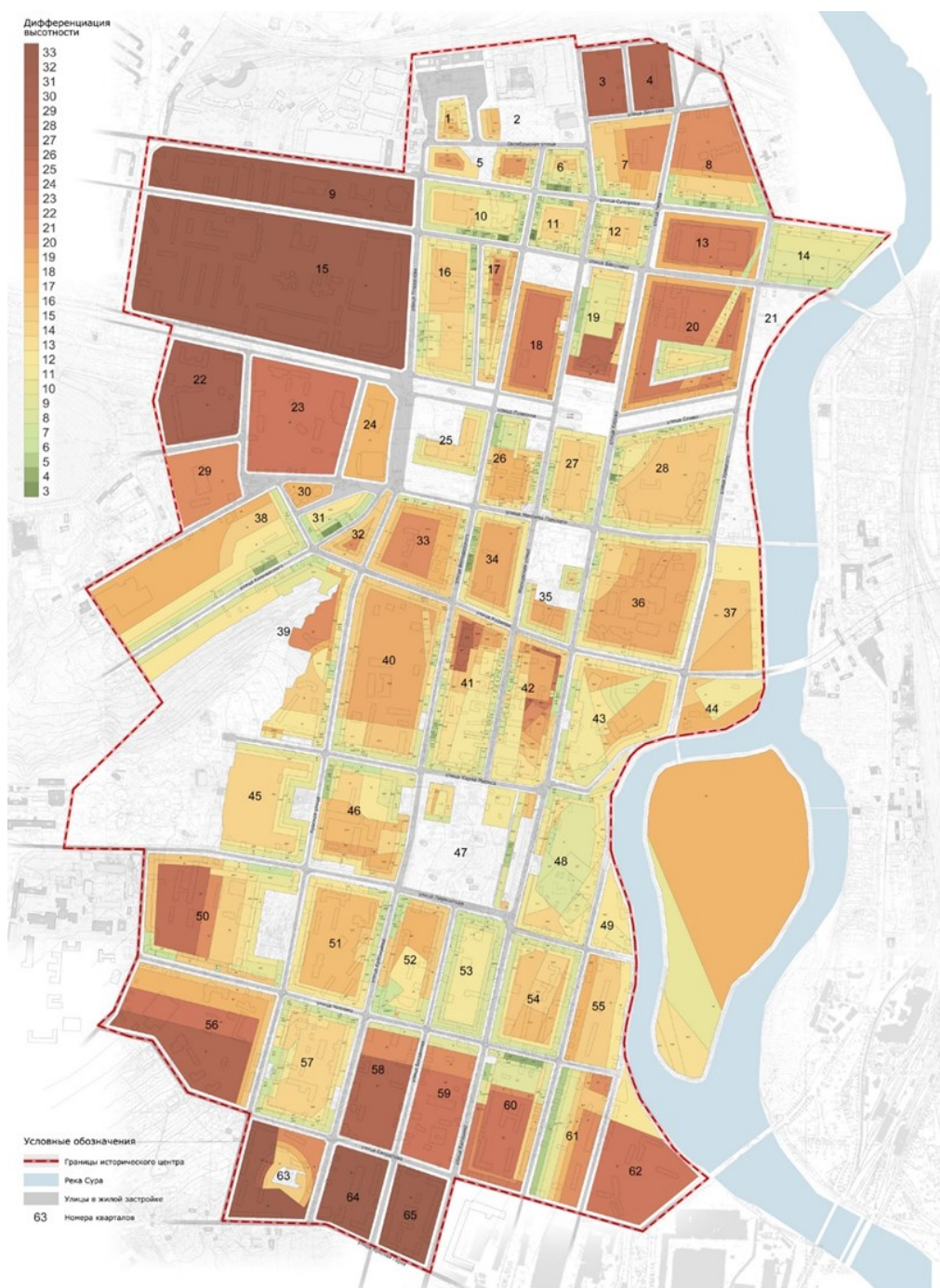


Рис. 3. Схема ограничений высотности в историческом центре города Пензы.
Разраб. Ухабин В.В., Соколова Н.В., 2022 г.

2. В процессе работы важным дополнением к методике стало предложение набора приёмов по маскировке ранее выявленных диссонирующих объектов, что позволит сгладить их негативное воздействие на пространство исторического центра города Пензы.

3. Была сформирована структура и содержание высотного регламента застройки исторического центра города Пензы. Данная структура может стать универсальной для других городов.

4. Рассмотрены варианты интеграции предложенного высотного регламента застройки исторического центра города Пензы в градостроительную документацию муниципального уровня.

Он может стать частью правил землепользования и застройки, или регламента, устанавливаемого для исторического поселения или объединенной охранной зоны объектов культурного наследия, а также может быть самостоятельным документом.

Предложенная комплексная методика в процессе апробации на примере исторического центра города Пензы подтвердила свою эффективность. Основным из ее достоинств является многоплановость и многофакторность, что позволяет получать максимально объективные результаты. Созданный в итоге исследования высотный регламент в случае его внедрения в градостроительную документацию муниципального уровня позволит остановить разрушение исторически сложившейся среды центра города и найти компромисс между ее сохранением и развитием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ухабин В.В., Соколова Н.В. Изучение особенностей зрительного восприятия архитектурных объектов и городской среды // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2022. № 3 (40). С. 235–245.
2. Беляева Е.Л. Архитектурно-пространственная среда города как объект зрительного восприятия. М.: Стройиздат, 1977. 125 с.
3. Крогиус В.Р. Город и рельеф. М.: Стройиздат, 1979. 120 с.
4. Белоусов В.Н. Кулага Л.Н. Основы формирования архитектурно-художественного облика городов. М.: Стройиздат, 1981. 190 с.
5. Регамэ С.К. Сочетание новой и сложившейся застройки при реконструкции городов. Москва: Стройиздат, 1989. 142 с.
6. Пруцын О.И., Рымашевский Б., Борусевич В. Архитектурно-историческая среда. М.: Стройиздат, 1990. 408 с.
7. Сотников Б.Е. Архитектурно-историческая среда. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 208 с.
8. Вавилонская Т.В., Черпак Н.В. Концепция высотного регулирования застройки исторического центра Самары // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. №. 2. С. 6–11.
9. London View Management Framework, supplementary planning guidance [Электронный ресурс]. URL: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/planning/implementing-london-plan/london-plan-guidance-and-spgs/london-view-management/> (дата обращения 12.05.2023)
10. Karaga K. Urban skyline planning strategy analysis; Case study: London [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/296695437_Urban_skyline_planning_strategy_analysis_Case_study_London (дата обращения 12.05.2023)
11. Tavernor R., Gassner G. Visual consequences of the plan: managing London's changing skyline // City, culture and society. 2010. №1. Pp. 99–108.
12. Building zone resolution / City of New York. Board of Estimate and Apportionment (Adopted July 25, 1916.) [Электронный ресурс]. URL: <https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/about/city-planning-history/zr1916.pdf> (дата обращения 17.08.2023)
13. Zoning Handbook. New York City Department of City Planning [Электронный ресурс]. URL: https://iris.nyt.edu/~maltwick/ESP/readings/Zoning_Handbook.pdf (дата обращения 17.08.2023)
14. Zoning regulations prescribing the requirements and limitations applicable throughout the several zoning districts of Broward county [Электронный ресурс]. URL: <https://www.broward.org/Planning/Zoning/Chapters/1968-zonning-regulations.pdf> (дата обращения 17.08.2022)
15. Building Height Standards Review for the Hobart City [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hobartcity.com.au/Projects/Current-projects/Building-Height-Standards-Review> (дата обращения 12.05.2023)
16. Nijhuis S., Van der Hoeven F. Exploring the Skyline of Rotterdam and The Hague. Visibility Analysis and its Implications for Tall Building Policy // Built Environment. 2018. №43. Pp. 571–588.
17. Ухабин В.В., Соколова Н.В. Методика выявления границ высотности новой застройки в историческом центре крупного города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. №25(1). С. 50–65.

Информация об авторах

Соколова Наталья Владимировна, кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры Градостроительство. E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пензенская область, г. Пенза, улица Германа Титова, д. 28.

Ухабин Владимир Витальевич, магистрант направления подготовки 07.04.01 Архитектура. E-mail: vladimir.ukhabin@yandex.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пензенская область, г. Пенза, улица Германа Титова, д. 28.

Поступила 26.08.2023 г.

© Соколова Н.В., Ухабин В.В., 2023

**Sokolova N.V., Uhabin V.V.*

Penza State University of Architecture and Construction

**E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru*

HEIGHT REGULATIONS FOR THE HISTORICAL CENTER OF PENZA

Abstract. *The historical center of the city is the main keeper of the cultural code of the city, since the most important historical and cultural objects are concentrated within its borders, the historical environment is preserved. Today, as a result of architectural and urban planning transformations, high-rise buildings appear here. As a result, there is a compositional destruction of the historical environment, distortion and spatial destruction of the established historical ensembles. The city of Penza is no exception: dozens of historical buildings have been lost, and their place has been taken by buildings of a larger scale and height that destroy the historical environment. The problem of regulating the height of new buildings in the historical environment of the city of Penza has acquired the most acute character and requires its solution. The aim of the study is to develop a height regulation for the historical center of Penza as an approbation of the previously proposed "comprehensive methodology for identifying the boundaries of the height of a new development in the historical center of a large city based on landscape-visual analysis." The research is based on the study of the problems of regulating the height of buildings in historical city centers in Russia and abroad, the analysis of scientific works and the legislative framework of the Russian Federation and the city of Penza in the field of height regulation, the systematization of domestic and foreign experience in the formation and regulation of height restrictions in historical city centers, a full-scale survey of the city, retrospective and landscape-visual analysis, graphical modeling. As a result of the conducted research, positive results were obtained: the proposed methodology, as a result of testing, confirmed its effectiveness, made it possible to identify landscape and visual features of the historical center of Penza and to form height restrictions within the boundaries of the historical center of the city, the structure and content of the high-rise regulations for the development of the historical center of the city were formed, options for integrating the high-rise regulations into the urban planning documentation of the municipal level were considered.*

Keywords: *historical center, view management framework, urban skyline planning, landscape-visual analysis.*

REFERENCES

1. Uhabin V.V., Sokolova N.V. Study of features of visual perception of architectural objects and surrounding buildings [Izuchenie osobennostei zritel'nogo vospriyatiya arkhitekturnykh ob'ektov i gorodskoi sredy]. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii*. 2022. Vol. 40. No. 3. Pp. 235–245. (rus)
2. Belyaeva E.L. Architectural and spatial environment of the city as an object of visual perception [Arkhitekturno-prostranstvennaya sreda goroda kak ob'ekt zritel'nogo vospriyatiya]. Moskva: Stroiizdat Publ., 1977. 125 p. (rus)
3. Krogus V.R. City and relief [Gorod i rel'ef]. Moskva: Stroiizdat Publ., 1979. 120 p. (rus)
4. Belousov V.N., Kulaga L.N. Osnovy formirovaniya arkhitekturno-khudozhestvennogo oblika gorodov. Moskva: Stroiizdat Publ., 1981. 190 p. (rus)
5. Regame S.K. Fundamentals of the formation of the architectural and artistic appearance of cities [Sochetanie novoi i slozhivsheisya zastroiki pri rekonstruktsii gorodov]. Moskva: Stroiizdat Publ., 1989. 142 p. (rus)
6. Prutsyn O.I., Rymashevskii B., Borusevich V. Architectural and historical environment [Arkhitekturno-istoricheskaya sreda]. Moskva: Stroiizdat Publ., 1990. 408 p. (rus)
7. Sotnikov B. E. Architectural and historical environment [Arkhitekturno-istoricheskaya sreda]. Ul'yanovsk: UIGTU Publ., 2010. 208 p. (rus)
8. Vavilonskaya T.V., Cherpak N.V. The concept of high-rise regulation of the development of the historical center of Samara [Kontseptsiya vysotnogo regulirovaniya zastroiki istoricheskogo tsentra Samary]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. No. 2. Pp. 6–11. (rus)
9. London View Management Framework, supplementary planning guidance. URL: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/plan->

ning/implementing-london-plan/london-plan-guidance-and-spgs/london-view-management/ (accessed: 12.05.2023)

10. Karaga K. Urban skyline planning strategy analysis. Case study: London. Available: https://www.researchgate.net/publication/296695437_Urban_skyline_planning_strategy_analysis_Case_study_London (accessed: 12.05.2023)

11. Tavernor R., Gassner G. Visual consequences of the plan: managing London's changing skyline. City, culture and society. 2010. No. 1. Pp. 99–108.

12. Building zone resolution. City of New York. Board of Estimate and Apportionment (Adopted July 25, 1916). URL: <https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/about/city-planning-history/zr1916.pdf> (accessed 17.08.2023)

13. Zoning Handbook. New York City Department of City Planning. URL: https://iris.nyit.edu/~maltwick/ESP/readings/Zoning_Handbook.pdf (accessed 17.08.2023)

14. Zoning regulations prescribing the requirements and limitations applicable throughout the several zoning districts of Broward county. URL: <https://www.broward.org/Planning/Zoning/Chapters/1968-zonning-regulations.pdf> (accessed 17.08.2022)

15. Building Height Standards Review for the Hobart City. URL: <https://www.hobartcity.com.au/Projects/Current-projects/Building-Height-Standards-Review> (accessed 12.05.2023)

16. Nijhuis S., Van der Hoeven F. Exploring the Skyline of Rotterdam and The Hague. Visibility Analysis and its Implications for Tall Building Policy. Built Environment. 2018. No. 43. Pp. 571–588.

17. Ukhabin V.V., Sokolova N.V. Methodology for identifying the boundaries of the height of a new development in the historical center of a large city [Metodika vyyavleniya granic vysotnosti novoj zastrojki v istoricheskom centre krupnogo goroda]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2023. No.1. Pp. 50–65.

Information about the authors

Sokolova, Natalia V. PhD, Assistant professor. E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza region, Penza, German Titov street, 28.

Uhabin, Vladimir V. Master student. E-mail: vladimir.ukhabin@yandex.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza region, Penza, German Titov street, 28.

Received 26.08.2023

Для цитирования:

Соколова Н.В., Ухабин В.В. Высотный регламент для исторического центра города Пензы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 64–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-64-72

For citation:

Sokolova N.V., Uhabin V.V. Height regulations for the historical center of Penza. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 64–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-64-72

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-73-81

Павлов А.А., Бергман А.В.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: pavloff.private@gmail.com*

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФОРМОТВОРЧЕСКАЯ БАЗА АРХИТЕКТУРЫ ЛЕНИНГРАДСКОГО КОНСТРУКТИВИЗМА

Аннотация. В статье рассмотрены композиционные особенности и приемы формообразования архитектуры 1920–1930-х годов на примере ленинградского архитектурного наследия конструктивизма. Речь идет о следующих объектах: Левашовский хлебозавод и Московский райсовет, Кировский Райсовет и Дворец культуры имени Газа И.И., Дворец культуры имени С.М. Кирова и Лиговский банно-прачечный комбинат. В исследовании объекты ленинградского конструктивизма проанализированы всесторонне: даны исторические справки, составлен ситуационный план, представлены архивные фотографии, а также проведен композиционный анализ, включающий авторскую графику, иллюстрирующую процесс формообразования каждого объекта. Собранные авторами в результате исследования материалы классифицированы и сгруппированы в сводную таблицу приемов формообразования архитектуры ленинградского конструктивизма, демонстрирующих сходство и различия характерных архитектурных решений. Полученные в результате анализа данные иллюстрируют композиционные особенности объектов ленинградского авангарда и выявляют основные приемы формообразования, характерные для архитектуры того периода. В итоге исследования были выявлены три основных типа объемно-пространственные композиции, характерные для архитектурных решений объектов ленинградского авангарда: тип 1 – сочетание цилиндра и параллелепипеда, тип 2 – здания с полуцилиндрическими ризалитами, тип 3 – сооружения с симметричным решением входа.

Ключевые слова: архитектура конструктивизма, ленинградский авангард, объемно-пространственная композиция, формообразование, композиционные особенности, здание Левашовского хлебозавода, здание Кировского райсовета, дворец культуры имени Кирова.

Введение. В наше время возникла проблема сохранения архитектурного наследия 1920–1930-х годов. Прошло сто лет с постройки первых сооружений в стиле конструктивизма. Многие памятники начали терять изначальный облик: одни находятся в критическом состоянии, другие деформированы несовершенной реконструкцией. Однако, есть примеры удачных современных реставраций зданий такие, как Дом Наркомфина архитектора М.Я. Гинзбурга в Москве, Левашовский хлебозавод инженера Г.П. Марсакова и Канатный цех с водонапорной башней завода «Красный гвоздильщик» архитектора Я.Г. Чернихова в Ленинграде. Сохранение зданий рассматриваемой эпохи становится чрезвычайно актуальной темой [1–3]. Поэтому авторы статьи обратились к теме сохранения наследия Ленинградского конструктивизма и проводят всестороннее исследование и глубокий анализ этого стиля, в том числе с точки зрения формообразования и композиционных особенностей. В 1920 – 1930-х годах художники, архитекторы и теоретики авангарда активно занимались развитием теории и практики формообразования. Супрематисты создавали не только плоскостные изображения, но и объемно-пространственные композиции. Яркими произведениями этого направления являются «Архитектуры» К.С. Малевича, «Архитектурные фантазии» Я.Г. Черни-

хова, «Стиль и эпоха» М.Я. Гинзбурга. Свои теоретические наработки конструктивисты будут реализовывать на практике. Таким образом, конструктивисты оформили свой творческий метод формообразования в самостоятельное направление (авангард). Теоретические разработки конструктивистов являлись источником вдохновения для многих современных архитекторов – Заха Хадид, Патрик Шумахер и др. Стоит отметить, что при изучении архитектуры конструктивизма требуется всесторонний анализ архитектурных объектов, в том числе с точки зрения формообразования и композиции. Кириков Б.М. и Штиглиц М.С. [4] в своих работах изучали объекты авангарда в контексте выявления ценностных характеристик объектов. Семенцов С.В. [5] рассматривает архитектуру Ленинграда с точки зрения «историко-генетического подхода». В его работах освещены аспекты формирования архитектурной среды Санкт-Петербурга в ключевой иерархической структуры. Изучением типологии форм отдельно взятых сооружений и ансамблей 1920–1930-х годов занимались С.П. Заварихин и А.А. Григорьев [6] в своей работе «Формотворческая база архитектуры конструктивизма-функционализма». В результате обследований 180 объектов были выведены некоторые базисные основы формообразования авангардной архитектуры. В нашем исследовании мы стремимся раз-

вить направления, заложенные ведущими российскими учеными в области архитектуры, подробно рассмотрев 17 зданий Ленинградского авангарда с точки зрения характерных объёмно-пространственных решений.

Методика исследования включает в себя изучение, анализ и систематизацию результатов, архивно-библиографического, картографического, иконографического материала. Проведен обзор теоретических работ по теме исследования. Основные методы исследования – графоаналитический, типологический, визуально-аналитический и метод моделирования.

Цель статьи. Рассмотреть приемы формообразования архитектуры Ленинградского конструктивизма и ее композиционные особенности.

Объектами исследования являются здания – представители ленинградского конструктивизма.

Задачи исследования. 1. Рассмотреть объекты архитектуры ленинградского авангарда с точки зрения истории их создания и архитектурно композиционных особенностей. 2. Выявить характерные приемы формообразования, используемые при создании Ленинградского авангарда. 3. Классифицировать и сгруппировать выявленные характерные приемы формообразования конструктивизма.

Основная часть. Рассмотрим основные приемы формообразования архитектуры 1920 – 1930-х годов на примере Ленинградского архитектурного наследия конструктивизма. Раскроем несколько типовых композиционных решений. Основываясь на визуальном анализе фотографий начала XX века и литературных источниках, составим сводную таблицу композиционных приемов формообразования (табл. 1), демонстрирующих сходство и различие характерных архитектурных решений, и разделим их на 3 группы в соответствии с выявленными композиционными элементами в структуре объекта.

Первая группа представлена в таблице зданиями Левашовского хлебозавода (рис 1, № 1) и Московского райсовета (рис 1, № 2), так же этот прием встречается в Ушаковских банях "Гигант", Круглых банях, Спорткомплексе "Динамо", Чкаловские бани и во многих других цилиндрических зданиях. Сочетание цилиндра и параллелепипеда позволяло архитекторам Ленинграда создать контраст между криволинейными и прямолинейными формами, что значительно обогащало композицию здания.

Ко *второй группе* относятся здания с полумасштабными ризалитами: Кировского Райсовета (рис 2, № 3) и Дворца культуры имени Газа И.И. (рис 2, № 4). Этот несложный, но эффективный прием встречается во многих зданиях

конструктивизма: Гостиница ВСЕГЕИ, Дом культуры Ленсовета, Жилмассивы на Лесном проспекте. Чаще всего ризалит являлся лестничной клеткой, как во Дворце культуры имени Газа, но иногда форма имела более сложную функцию, как в Кировском райсовете. Несмотря на свою простоту ризалит, добавлял выразительность зданию.

Третья группа объединяет сооружения с симметричным решением входа: Дворец культуры имени С.М. Кирова (рис 3, № 5) и Лиговский банно-прачечный комбинат (рис 3, № 6). Этот прием встречается и в других зданиях: Дворца культуры имени Горького А.М., ДOME культуры Союза кожевников имени Капранова, Станционных и Чкаловских банях. Архитекторы периода авангарда использовали динамичные композиции, но не забывали и о симметрии в своих работах. К примеру, во Дворце культуры имени Кирова два вертикальных ризалита не только выделяли вход, но и разбавляли горизонтально развивающуюся форму. В Лиговских банях симметрия завершает композицию главного корпуса. Создавая новые здания, архитекторы-конструктивисты использовали новаторские композиционные приемы в своей архитектуре.

Композиционные особенности объектов архитектуры ленинградского конструктивизма.

Левашовский хлебозавод-автомат (рис. 1, № 1). В первые годы советской власти остро встал вопрос автоматизации производства по выпуску хлебных изделий для населения. В начале 1920-х годов хлебозаводы возводились на базе немецких и американских технологий. Но уже через несколько лет начали разрабатываться передовые типы отечественных производств. Появились проекты, которые некоторое время называли типовыми. Так Кушелевский хлебозавод-автомат именовали как «типовой хлебозавод автомат на Кушелевке». Фактически проекты имели сходство и серьезные различия. В 1933 году по так называемому «типовому проекту» архитектора Георгия Петровича Марсакова был введен в эксплуатацию Левашовский хлебозавод-автомат. Объект расположен на территории квартала, ограниченного с севера Левашовским проспектом, с запада – Б. Зелениной улицей, с юго-востока – Барочной улицей [6–8]. Основываясь на теории машин, Г.П. Марсаков гармонично соединил функциональные, конструктивные и художественные новации в проекте Левашовского хлебозавода-автомата. Сооружение является представителем зрелого конструктивизма. В основе композиции здания лежит работа с цилиндрическими объёмами. Концентрическое размещение оборудования предусматривает конвейерную

вертикально кольцевую технологию приготовления хлеба. В центре здания размещена круглая вращающаяся печь. Композиционным акцентом можно считать контраст между главным шестиэтажным корпусом и параллелепипедом лестничной клетки. Пятый этаж украшен поясом. Второй

корпус так же имеет цилиндрическую форму. Его особенностью является ритм второго и третьего этажа. В течении 20 века завод активно достраивали и реконструировали. На данный момент в здании завершена реконструкция.

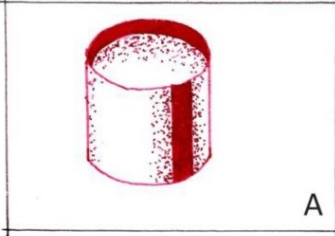
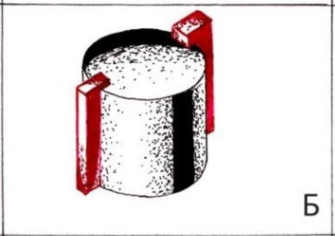
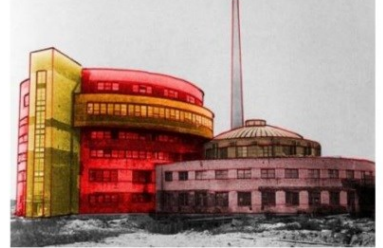
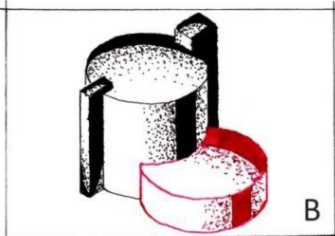
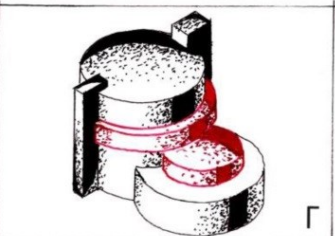
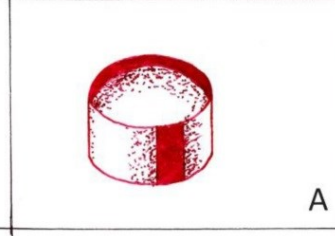
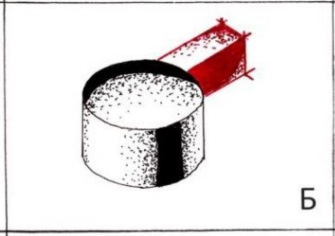
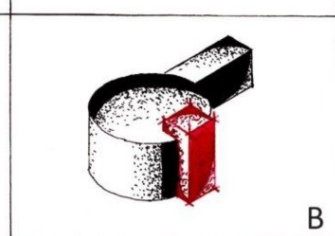
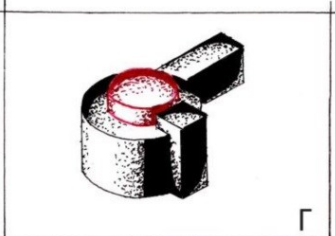
№ п/п	Объемно-пространственная композиция (формообразование). авторская графика Павлова А.А.		Историческая фотофиксация
			Ситуационный план (в г. Санкт-Петербурге)
№1 Группа 1. Цилиндрический объём с параллелепипедом			 Левашовский хлебозавод, 1930-1933, Марсаков Г. П., Фотография, 1933 (источник изображения – [1, с.233])
	А. Основной объём здания представлен цилиндром.	Б. Добавление двух вертикальных параллелепипедов	
			 Адрес. Левашовский пр., 26х (источник изображения – https://rgis.spb.ru/mapui/)
	В. Второй цилиндрический корпус	Г. Усложнение формы	
№2. Группа 1 Цилиндрического объёма с параллелепипедом			 Московский райсовет, 1930-1935, арх-ры Фомин И. И., Даугуль В. Г., Серебровский Б. М. Фотография, 1940 (источник изображения – https://pastvu.com/p/1853951)
	А. Основной объём здания представлен цилиндром.	Б. Контраст между цилиндром и параллелепипедом корпуса	
			 Адрес. Московский пр., 129
	В. Контраст между цилиндром и лестничной клетки	Г. Ритм цилиндров	

Рис. 1. Приемы формообразования архитектуры ленинградского конструктивизма.
Группа 1: сочетание цилиндра и параллелепипеда

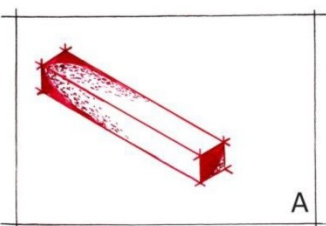
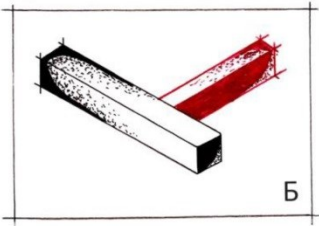
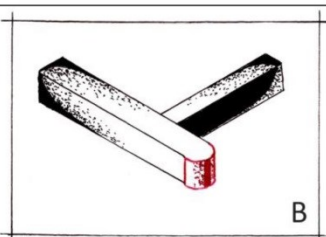
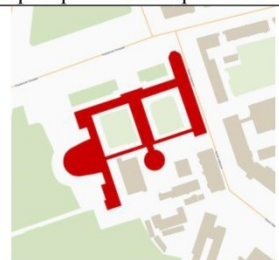
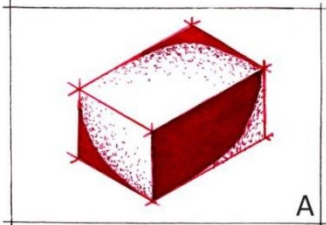
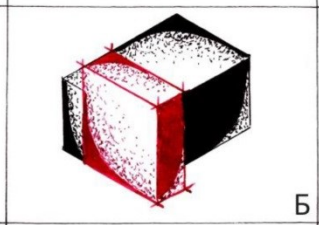
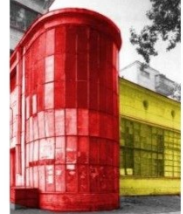
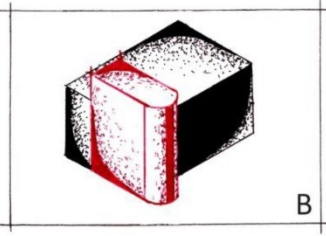
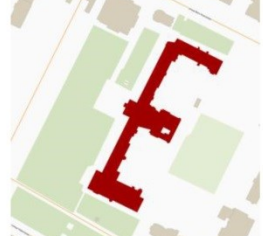
№ п/п	Объемно-пространственная композиция (формообразование). авторская графика Павлова А.А.		Историческая фотофиксация
			Ситуационный план (в г. Санкт-Петербурге)
№3. Группа 2 Полуцилиндрический ризалит			 Райсовет Кировский, 1930 – 1934, Н. А. Троцкий, Фотография, 1939 – 1941 (источник изображения – https://pastvu.com/p/1248940)
		А. Боковой фасад Б. Главный фасад В. Контраст между полукруглым ризалитом и параллелепипедом	 Адрес. Проспект Стачек. 18
№4. Группа 2 Полуцилиндрический ризалит			 Дворец культуры им. Газа И. И., 1930 – 1935, арх. А. И. Гегелло, (источник изображения – [1, с.130])
		А. Основной объём здания представлен параллелепипедом Б. Возникновение ризалита В. Контраст полукруглого ризалита и основного объёма	 Адрес. Стачек пр., 72

Рис. 2. Приемы формообразования архитектуры ленинградского конструктивизма.

Группа 2: здания с полуцилиндрическими ризалитами

Московский райсовет (рис. 1, № 2). По генеральному плану 1935 – 1939 годов на месте, где в конце 19 века велась активная торговля, предусматривалось создание нового общественного центра. В 1930 – 1935 годах по проекту архитекторов Фомина И.И., Серебровского Б.М., Даугули В.Г. построен Московский райсовет. Здание для районных органов власти расположено на Московском проспекте – значимой магистрали города Ленинграда [9, 10]. Основным объём здания представлен цилиндром. Главным композиционным акцентом можно считать контраст между цилиндром главного корпуса и параллелепипедом лестничной клетки. Вытянутый параллелепипед трёхэтажного здания так же подчерки-

вает композиционный контраст с цилиндром. Пятиэтажное здание завершается конусообразной стеклянной крышей, что придает зданию интересный силуэт. Сооружение обильно украшено пилонами, наличниками, столбами, балконами. Эти детали образуют дробную рельефную поверхность. Райсовет является прекрасным представителем переходного периода конструктивизма к классике. В 1970-е годы перед зданием организовали небольшое озеленение, и в двухэтажном корпусе, выходящем во двор, расположили кинотеатр «Московский». В 1980-е здесь осуществлен выборочный капитальный ремонт. На данный момент райсовет находится в удовлетворительном состоянии, и продолжает выполнять свою первоначальную функцию.

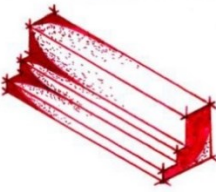
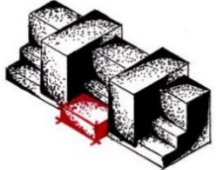
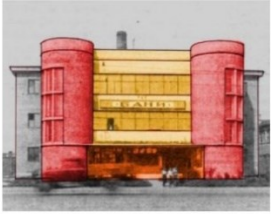
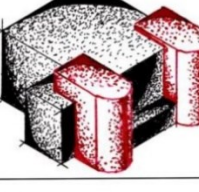
№ п/п	Объемно-пространственная композиция (формообразование). авторская графика Павлова А.А.		Историческая фотофиксация Ситуационный план (в г. Санкт-Петербурге)	
№5. Группа 3 Симметричное решение двух вертикальных полуцилиндрических объемов	 А	 Б	 Дворец культуры имени С. М. Кирова, 1931-1937, Н. А. Троцкого и С. Н. Казака Фотография, 1940 (источник изображения https://pastvu.com/p/123337)	
	 В	А. Основной объем ступенчатой формы Б. Два массивных ризалита В. Выделение главного входа		 Адрес. Большой проспект В.О., 83
№6. Группа 3 Симметричное решение двух вертикальных полуцилиндрических объемов	 А А. Основной объем	 Б Б. Два ризалита	 Лиговский банно-прачечный комбинат, 1934, Н.Ф. Демкова Фотография, 1940 (источник изображения – [10, с.176])	
	 В В. Выделение главного входа	 Г Г. Контраст полукруглых ризалитов и основного объема	 Адрес. Лиговский пр., 269	

Рис. 4. Приемы формообразования архитектуры ленинградского конструктивизма.
Группа 3: сооружения с симметричным решением входа

Кировский райсовет (рис. 2, № 3). По генеральному плану реконструкции района, составленного в 1924 году архитектором Л.А. Ильиным, на двух площадях Стачек и Кировской и прилегающих кварталах сложился общественный центр Кировского района. Доминантой конструктивистского ансамбля стал Кировский райсовет, построенный в 1930–1934 годах по проекту архитектора Ноя Абрамовича Троцкого. Кировский райсовет – первое сооружение нового типа административных зданий. В нем размещались районные органы власти, культурные учреждения, банк, почта и большой зал собраний, становясь центром общественной и политической жизни. Различным функциям отвечала разветвленная и асимметричная планировка здания. Образ Кировского райсовета создан средствами

конструктивистской архитектуры, пронизан динамикой и мощной энергией [11, 12]. В объемно-пространственной композиции здания нас интересует боковой фасад, завершенный сочетанием полуцилиндрического ризалита и параллелепипедом главного корпуса. Контраст округлых форм и прямолинейных линий является устойчивым приемом конструктивизма. В отличие от других построек архитектор использует ризалит не как лестничную клетку. Оба элемента украшены сплошным ленточным остеклением. Первый этаж отличается длинными галереями полуцилиндрических столбов, визуально приподнимающих корпус здания. В настоящее время Кировский райсовет продолжает выполнять функции общественного центра и градостроительной

доминантой. В нём располагаются Администрация района, отделение почтовой связи, другие учреждения.

Дворца культуры имени И.И. Газа (рис. 2, № 4). В 1930–1935 годах по проекту Гегелло А.И. и Кричевского Д.Л. построена клубная часть Дворца культуры имени И.И. Газа. Она построена для рабочих завода «Красный путиловец» и при их активной помощи [13]. Четырёхэтажный корпус – главная часть композиции здания здесь расположен приземистый параллелепипед малого зала с огромным горизонтальным остеклением. Рядом выступает стеклянный полуцилиндрический объём, внутри которого расположена винтовая лестница. Сочетание ризалита и параллелепипеда является устойчивым приемом конструктивизма. В отличие от других построек архитектор активно использует стеклянные поверхности, что придает необычайную лёгкость всей конструкции. В 1961–1967 строительство возобновилось. Архитектор Полторацкий Е.М. и инженер Бубарина Л.Н. достроили левое крыло и центральную часть. В настоящее время здание продолжает функционировать и находится в удовлетворительном состоянии, хотя со временем хрупкие детали витража пострадали.

Дворец культуры имени С. М. Кирова (рис. 3, № 5). В 1930–1937 годах по проекту Н.А. Троцкого и С.Н. Казака был построен Дворец культуры имени С.М. Кирова. Он расположен на площади между Средним и Большим проспектами Васильевского острова на бывшем пустыре Смоленского поля [14–16]. Дворец должен был стать центром общественной жизни не только для рабочих промышленных районов юго-западной части острова, но и жителей доходных домов восточной. Он стал градостроительной доминантой. Памятник имеет необычную для конструктивизма композицию, в стиль ленинградского авангарда были внедрены черты классицистической монументальности. Основная пятиэтажная часть здания решена по симметричной схеме: два массивных ризалита выделяют и фланкируют прямоугольный выступ главного входа. Это решение является интересным сочетанием статичных, вертикальных элементов в динамичной, горизонтальной композиции. Также ступенчатое построение основных объёмов на нижних этажах, опорные столбы, горизонтальные окна с узкими простенками – типичные элементы конструктивизма сочетаются в этом здании с элементами классицизма – «упрощенным» ордером, массивностью и помпезностью входной группы. Сочетание более легкой нижней и утяжеленной верхней части здания являются интересным, авангардным решением тектоники в объемно-пространственной композиции. После постройки

Дворца в 1930-е годы, окружающая его архитектурная среда изменилась. Василеостровский сад расширился до Среднего проспекта, а в 1948–1950 годах перед фасадом здания с южной стороны разбит сквер, который сейчас превращен в парковку. В начале 21 века перед зданием возникло несколько высотных офисных зданий. Сейчас Дворец на фоне новых сооружений теряется, но продолжает выполнять функции общественного и культурного центра всего района.

Лиговский банно-прачечный комбинат и Станционные бани (рис. 3, № 6). Другой памятник, имеющий симметричное решение объемно-пространственной композиции – «Лиговский банно-прачечный комбинат» и его брат-близнец «Станционные бани» спроектированные в начале 1930-х годах Н.Ф. Демковым, О. Быстрым, Е. Фомичевым. Типовой проект был рассчитан на 500 человек в час и имел достаточно разработанный план, соответствующий сложной функции бани. В начале 20 века типовое строительство встречалось редко. Два сооружения имеют идентичное решение главного корпуса, но каждый имеет свою дополнительную функцию. Отличительной чертой Лиговских бань является наличие прачечного корпуса. Особенность Станционной бани наличие бассейна, который появился после перестройки 1936 года [17, 18]. Оба сооружения имеют переменную этажность и необычную в плане форму соответствующую сложной функции бани. Главный вход отличается симметричным решением. Углы торцевого фасада здания оформляют два полуцилиндрических ризалита лестничные клетки с горизонтально ориентированными окнами. Первый этаж слегка выступает вперед линии фасада, тем самым выделяя вход. Второй и третий этаж украшен ленточным остеклением [18]. Станционные бани были реконструированы в 2010 году. В 2021 году комплекс Лиговского банно-прачечного комбината признан памятником архитектуры. Здание продолжает выполнять свою первоначальную функцию.

На основании проведенного анализа композиционных особенностей объектов авангарда выделим устойчивые объемно-пространственные композиции, которые лежат в основе формотворческой базы архитектуры ленинградского конструктивизма (рис. 4):

1. *Группа 1.* Сочетание цилиндрического объёма с параллелепипедом (рис. 4, А). Контраст криволинейных и прямолинейных форм.
2. *Группа 2.* Небольшой вертикальный полуцилиндрический объём в сочетании с параллелепипедом (рис. 4, Б). Композиционный акцент формы.
3. *Группа 3.* Симметричное решение двух вертикальных полуцилиндрических объёмов, со-

единенных ступенчатыми формами в виде нескольких параллелепипедов (рис. 4, В). Сбалансированная композиция, содержащая большое количество разнохарактерных объёмов.

Заключение. Приведённые выше данные, сгруппированные в единую таблицу, наглядно показывают сходство и различие образов некоторых объектов ленинградского авангарда (рис. 1–3). На основании этих данных была проведена

группировка и классификация приемов, применяемых при создании объёмно-пространственной композиции, лежащей в основе образной составляющей объектов архитектуры ленинградского конструктивизма. Каждая группа соответствует одному из трех выявленных типов объёмно-пространственной композиции, показанных на рисунке 4.

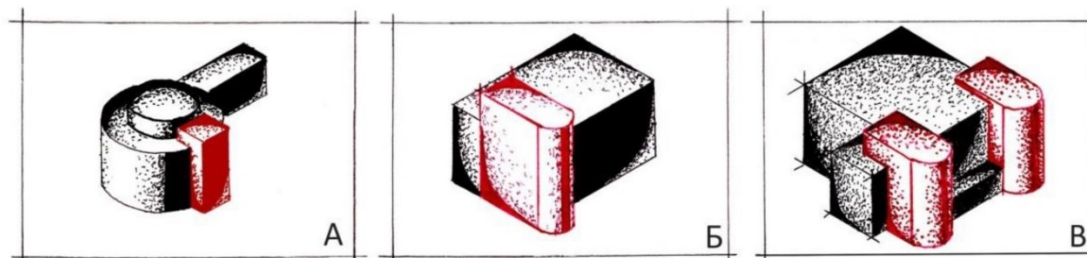


Рис. 4. Устойчивые объёмно-пространственные композиции, лежащие в основе формообразования объектов ленинградского конструктивизма. А – сочетание цилиндрического объёма с вертикальным параллелепипедом; Б – полуцилиндрический ризалит; В – симметричное решение входной группы.

Авторская графика Павлова А.А.

В результате исследования были выявлены три группы композиционных приемов: сочетание цилиндрического объёма с вертикальным параллелепипедом, полуцилиндрический ризалит и два симметричных объёма фланкирующих вход. Выполненный в ходе исследования анализ иллюстрирует, что выявленные композиционные особенности объектов ленинградского конструктивизма напрямую связаны с характерными приемами формообразования архитектуры авангарда.

Источник финансирования. Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательских работ «Архитектурная комбинаторика конструктивизма Санкт-Петербурга», в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ обучающимися СПбГАСУ в 2023 году.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zalivako, Anke. Die Bauten des russischen Konstruktivismus, Moskau 1919-32: Baumaterial, Baukonstruktion, Erhaltung. Petersberg : Imhof, cop. 2012. 576 p.
2. Allan, J. Points of Balance: Patterns of Practice in the Conservation of Modern Architecture // Journal of Architectural Conservation. 2007. Vol. 13(2). Pp. 13–46
3. Дубровина Н. П. Дома культуры Ленинграда. Проблемы использования и сохранения // Урбанистика. 2019. № 3. С. 7–17. DOI:10.7256/2310-8673.2019.3.30075
4. Кириков Б.М., Штиглиц М.С. Архитектура ленинградского авангарда. Путеводитель: Коло, 2020. 312 с.
5. Семенцов С.В. Развитие революционного архитектурного авангарда в Петрограде - Ленинграде по градостроительным канонам императорского Санкт-Петербурга. Часть 1. От Петра Великого до В. И. Ленина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2017. Т. 7. №2. 249–272. DOI:10.21638/11701/spbu15.2017.207
6. Заварихин С.П., Григорьев А.А. Формотворческая база архитектуры конструктивизма-функционализма // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4. С. 11–16.
7. Штиглиц М. С. Промышленная архитектура Петербурга. М.: Коло, 2023. 232 с.
8. Штиглиц М.С. Первые механические хлебозаводы Петрограда – Ленинграда. От неоромантизму к зрелому конструктивизму // Архитектурное наследство. 2020. Вып. 72. С. 207–217.
9. Stieglitz M.S. Peculiarities of stylistic evolution of mid-19th – early 20th century St.-Petersburg industrial architecture // Proceedings of the International Conference on Art Studies: Science, Experience, Education. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Paris: Atlantis Press, 2018. Pp. 435–439. DOI:10.2991/icassee-18.2018.90
10. Каменский В.А. О здании Московского райсовета // Архитектура Ленинграда. 1939. № 6. С. 17–18
11. Векслер А.Ф., Крашенинникова Т.Я. Московский проспект. Очерки истории. СПб. : Издательство «Центрполиграф». 2014. 248 с.
12. Архитектура СССР. Журнал: Жургазобъединение. 1934. № 10. 80 с.

13. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. Книга первая. Проблемы формообразования. Мастера и течения. М.: Стройиздат, 1996. 709 с.

14. Дубровина Н.П. Градостроительная роль Дворцов культуры Ленинграда первой трети XX века на примере Петроградского и Василеостровского районов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 76–81. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-3-76-81

15. Макагонова М.Л., Архитектурная графика эпохи конструктивизма в собрании Государственного музея истории. Санкт-Петербурга. Каталог. СПб.: ГМИСПб. 2008. 264 с.

16. Hatherley O. Communist Landscapes: A History Through Buildings: The New Press. 2016. 626 p.

17. Богданов И.А. Три века петербургской бани. СПб. М.: Искусство – СПб, 2000. 254 с.

18. Стругач А.Г. Архитектор Николай Фёдорович Демков // Вестник гражданских инженеров. 2010. №4. С. 23–27.

Информация об авторах

Бергман Анастасия Владимировна, ассистент кафедры Истории и теории архитектуры. E-mail: stasie_b@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Павлов Андрей Алексеевич, студент направления «Реставрация и реконструкция архитектурного наследия», 2 курс. E-mail: pavloff.private@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 24.09.2023 г.

© Павлов А.А., Бергман А.В., 2023

Pavlov A.A., *Bergman A.V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: stasie_b@mail.ru*

COMPOSITIONAL FEATURES AND FORM-CREATIVE BASIS OF LENINGRAD CONSTRUCTIVISM ARCHITECTURE

Abstract. The article examines the compositional features and methods of shaping the architecture of the 1920s–1930s using the example of the Leningrad architectural heritage of constructivism. We are talking about the following objects: Levashovsky Bakery Plant and the Moscow District Council, the Kirov District Council and the Palace of Culture named after Gaza I.I., the Palace of Culture named after S.M. Kirov and the Ligovsky Bath and Laundry Plant. In the study, the objects of Leningrad constructivism were analyzed comprehensively: historical information was given, a situational plan was drawn up, archival photographs were presented, and a compositional analysis was carried out, including the author's graphics, illustrating the process of shaping each object. The materials collected by the authors as a result of the study are classified and grouped into a summary table of techniques for shaping the architecture of Leningrad constructivism, demonstrating the similarities and differences of characteristic architectural solutions. The data obtained as a result of the analysis illustrate the compositional features of the objects of the Leningrad avant-garde and reveal the main techniques of shaping characteristic of the architecture of that period. As a result of the study, three main types of volumetric-spatial compositions were identified, characteristic of the architectural solutions of Leningrad avant-garde objects: type 1 – a combination of a cylinder and a parallelepiped, type 2 – buildings with semi-cylindrical projections, type 3 – buildings with a symmetrical entrance solution.

Keywords: constructivist architecture, Leningrad avant-garde, volumetric-spatial composition, shape formation, compositional features, the building of the Levashovsky bakery, the building of the Kirov district council, the Kirov Palace of Culture.

REFERENCES

1. Zalivako, Anke. Die Bauten des russischen Konstruktivismus, Moskau 1919-32: Baumaterial, Baukonstruktion, Erhaltung. Petersburg. Imhof, cop. 2012. 576 p.

2. Allan, J. Points of Balance: Patterns of Practice in the Conservation of Modern Architecture. Journal of Architectural Conservation. 2007. Vol. 13(2). Pp. 13–46

3. Dubrovina N.P., Houses of Culture of Leningrad. Problems of use and conservation [Doma kul'tury Leningrada. Problemy ispol'zovaniya i sohraneniya]. Urbanism. 2019. No. 3. Pp. 7–17. DOI: 10.7256/2310-8673.2019.3.30075 (rus)

4. Kirikov B.M., Stiglitz M.S. Architecture of the Leningrad avant-garde. Guide [Arhitektura leningradskogo avangarda. Putevoditel']. Kolo, 2020. 312 p. (rus)

5. Sementsov S.V., Development of the revolutionary architectural avant-garde in Petrograd - Leningrad according to the urban planning canons of Imperial St. Petersburg. Part 1. From Peter the Great to V.I. Lenin [Razvitie revolyucionnogo arhitekturnogo avangarda v Petrograde - Leningrade po gradostroitel'nym kanonom imperatorskogo Sankt-Peterburga. CHast' 1. Ot Petra Velikogo do V. I. Lenina]. Bulletin of St. Petersburg University. Art history. 2017. Vol. 7. No. 2. Pp. 249-272. DOI:10.21638/11701/spbu15.2017.207 (rus)
6. Zavarikhin S.P., Grigoriev A.A. Form-creative basis of the architecture of constructivism-functionism [Formotvorcheskaya baza arhitektury konstruktivizma-funkcionalizma]. Bulletin of Civil Engineers. 2010. No.4. Pp. 11-16. (rus)
7. Stieglitz M.S. Industrial architecture of St. Petersburg [Promyshlennaya arhitektura Peterburga]. Kolo, 2023. 232 p. (rus)
8. Stiglitz M.S. The first mechanical bakeries of Petrograd - Leningrad. From neo-romanticism to mature constructivism [Pervye mekhanicheskie hlebozavody Petrograda – Leningrada. Ot neoromantizmu k zreloму konstruktivizmu]. Architectural Heritage. 2020. No. 72 Pp. 207–217. (rus)
9. Stieglitz M.S. Peculiarities of stylistic evolution of mid-19th – early 20th century St.-Petersburg industrial architecture. Proceedings of the International Conference on Art Studies: Science, Experience, Education. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Paris: Atlantis Press. 2018. Pp. 435–439. DOI:10.2991/icassee-18.2018.90
10. Kamensky V.A. About the building of the Moscow District Council [O zdanii Moskovskogo rajsoвета]. Architecture of Leningrad. 1939. No. 6. Pp. 17–18 (rus)
11. Veksler A.F., Krashenninnikova T.Ya. Moskovsky prospect. Essays on history. St. Petersburg [Moskovskij prospekt. Ocherki istorii. SPb.]. Publishing house "Tsentrpoligraf". 2014. 248 p. (rus)
12. Architecture of the USSR. Journal [Arhitektura SSSR. Zhurnal]. Zhurgazooobedinenie. 1934. No 10. 80 p. (rus)
13. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet avant-garde. Book one. Formation problems. Masters and movements. [Arhitektura sovetskogo avangarda. Kniga pervaya. Problemy formoobrazovaniya. Mastera i techeniya]. Stroyizdat, 1996. 709 p. (rus)
14. Dubrovina N.P. Urban planning role of the Palaces of Culture of Leningrad in the first third of the twentieth century on the example of the Petrograd and Vasileostrovsky districts [Gradostroitel'naya rol' Dvorcov kul'tury Leningrada pervoj treti HKH veka na primere Petrogradskogo i Vasileostrovskogo rajonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 76–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-76-81 (rus)
15. Makagonova M.L., Architectural graphics of the era of constructivism in the collection of the State Museum of History. St. Petersburg [Arhitekturnaya grafika epohi konstruktivizma v sobranii Gosudarstvennogo muzeyaistorii. Sankt-Peterburga]. GMISPB. 2008. 264 p. (rus)
16. Hatherley O., Communist Landscapes: A History Through Buildings. The New Press, 2016. 626 p.
17. Bogdanov I.A. Three centuries of the St. Petersburg bathhouse [Tri veka peterburgskoj bani]. Art - St. Petersburg, 2000. 254 p. (rus)
18. Strugach A.G. Architect Nikolai Fedorovich Demkov [Arhitektor Nikolaj Fyodorovich Demkov]. Bulletin of Civil Engineers. – St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2010. No. 4. Pp. 23–27. (rus)

Information about the authors

Bergman, Anastasia V. Teaching assistant. E-mail: stasie_b@mail.ru. St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 4.

Pavlov, Andrey A. Bachelor student. E-mail: pavloff.private@gmail.com. St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 4.

Received 24.09.2023

Для цитирования:

Павлов А.А., Бергман А.В. Композиционные особенности и формотворческая база архитектуры ленинградского конструктивизма // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 73–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-73-81

For citation:

Pavlov A.A., Bergman A.V. Compositional features and form-creative basis of leningrad constructivism architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 73–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-73-81

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-82-92

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: novosyolovag@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛИЗУЮЩЕГО ЭФФЕКТА КРИОЛИТА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕССЫ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения в качестве минерализующей добавки при обжиге клинкера криолита Na_3AlF_6 – основного фторсодержащего соединения техногенного продукта электролитического производства алюминия. Приводится сравнительная оценка эффективности действия криолита Na_3AlF_6 , как минерализатора, и фторида кальция CaF_2 – вещества, которое обладает наиболее эффективным минерализующим действием. Рассматривается влияние добавок-минерализаторов на процессы диссоциации карбоната кальция, усвоения свободного оксида кальция с образованием силикатов, алюминатов и ферритов кальция, жидкофазного спекания и клинкерообразования с синтезом основных клинкерных минералов. Подробно рассмотрены физико-химические процессы, протекающие при нагревании сырьевых смесей бездобавочной и с добавлением минерализаторов CaF_2 и Na_3AlF_6 до температуры спекания клинкера 1450 °С. Приводится динамика изменения качественного фазового состава продуктов обжига при различных температурах, начиная от 700 °С и до температуры спекания клинкера 1450 °С, а также количественная характеристика интенсивности образования основных клинкерных минералов. Определено, что криолит обладает минерализующим эффектом и может быть использован в качестве минерализатора при обжиге клинкера. Эффективность действия криолита сопоставима с эффективностью действия фторида кальция, а температура обжига клинкера может быть снижена до 1400 °С.

Ключевые слова: минерализатор, криолит, обжиг клинкера, замена фторида кальция, температура обжига клинкера.

Введение. Применение минерализаторов при обжиге клинкера способствует повышению реакционной способности сырьевых смесей и ускорению протекания физико-химических процессов. Образование основных клинкерных минералов происходит в более низком температурном интервале и с большей скоростью. В качестве минерализаторов могут выступать различные соединения, которые нарушают равновесное состояние системы и смещают протекание процессов в сторону снижения температуры. Это позволяет получать продукт при пониженной температуре с сохранением качества или интенсифицировать процесс обжига трудносжигаемых сырьевых смесей [1–5] тем самым, улучшить качество клинкера и повысить производительность печных агрегатов [6–9]. Минерализаторы могут оказывать влияние на процессы, протекающие при обжиге, в разном температурном интервале. В процессе протекания твердофазовых реакций минерализующий эффект могут проявлять соединения, которые не будут оказывать существенного влияния на процессы спекания при образовании клинкерного расплава и формирования алита, и наоборот [10, 11]. Поэтому могут применяться комплексные добавки в виде комбинаций различных соединений, по причине дости-

жения более высокой эффективности при их совместном введении, чем при раздельном использовании.

Наиболее эффективным «классическим» минерализатором является флюорит CaF_2 . Эффективность действия фторида кальция подтверждена многими работами, что позволяет использовать его в промышленном производстве. Особенно широко CaF_2 используется при производстве белого клинкера, спекание которого сильно затруднено в силу особенности химического состава сырьевой смеси [12–14]. Однако есть определенные трудности по использованию природного флюорита в качестве минерализатора из-за ограниченного количества месторождений и достаточно высокой стоимости. Альтернативным минерализатором может выступать техногенный продукт электролитического производства алюминия [15–17], который в своем составе содержит фтор, но не в виде фторида кальция CaF_2 , а в виде криолита Na_3AlF_6 [18–20]. Поэтому целесообразно будет рассмотреть возможность использования криолита как минерализатора и сравнить эффективность его действия с фторидом кальция.

Методы, оборудование, материалы. Объектом исследования стала сырьевая смесь (табл. 1), составленная из химических реактивов карбоната кальция, оксидов кремния, алюминия

и железа со степенью чистоты «химически чистый».

Рассчитанная сырьевая смесь предполагает получение рядового клинкера (табл. 1), характе-

ризующегося минералогическим составом и модульными характеристиками, приведенными в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав сырьевой смеси и клинкера, %

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	ППП	Сумма
Сырьевая смесь	14,69	3,14	2,76	44,41	34,99	100
Клинкер	22,6	4,83	4,25	68,31	–	100

Таблица 2

Минералогический состав и модульные характеристики синтезированных клинкеров

Расчетный фазовый состав, масс. %				Модули		
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	КН	n	p
67,85	13,62	5,59	12,92	0,93	2,49	1,14

В качестве минерализующих добавок были использованы реактив фторида кальция и криолит, которые вводились в сырьевую смесь сверх 100 % в количестве 1 % по содержанию иона фтора (F⁻). Из приготовленных смесей прессовались цилиндрические образцы массой 2 г, которые обжигались партиями в лабораторной печи в интервале температур 700–1450 °С с выдержкой в течение 15 минут и шагом отбора проб 100 °С.

Сырьевые смеси подвергались комплексному термическому анализу в среде аргона на приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 фирмы NETZSCH, который совмещен с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 Aeolos для анализа состава выделяющейся из образца газовой фазы.

Исследование полноты усвоения оксида кальция в синтезированных образцах осуществлялось этилово-глицератным методом.

Рентгенофазовый анализ проводился методом порошковой дифрактометрии на приборе ARL X'TRA, в интервале двойных углов отражения 2θ – 4...64 градуса.

Основная часть. С целью подробного рассмотрения процессов, протекающих в высокотемпературном интервале обжига клинкера и способствующих раннему усвоению оксида кальция, проводился комплексный термический анализ сырьевых смесей. Отличия в протекании процессов фиксируются при сравнении поведения кривых дифференциально-сканирующей калориметрии, характеризующих изменения в сырьевых смесях без добавления минерализаторов и с введением CaF₂ и криолита.

При нагревании до температуры около 600 °С кривые дифференциально-сканирующей калориметрии характеризуются идентичным по-

ведением. При дальнейшем нагревании бездобавочной смеси начинается процесс декарбонизации, который выражен четким эндотермическим эффектом с вершиной при 818 °С (рис. 1). По кривой термогравиметрии можно судить о высокой скорости протекания процесса и определить окончание декарбонизации при температуре 845 °С, когда прекращается потеря массы образцом, которая связана с выделением углекислого газа (рис. 2).

При анализе результатов дифференциально-сканирующей калориметрии смеси с добавлением фторида кальция стоит отметить, что процесс декарбонизации характеризуется более растянутым температурным интервалом. Начинается процесс декарбонизации при более низкой температуре около 600 °С, по сравнению с бездобавочной смесью. Однако кривая ДСК в данном случае имеет три пиковые вершины при достижении температуры 747 °С, 783 °С и 847 °С. Прекращается процесс гораздо позже – при температуре около 910 °С, что выше температуры декарбонизации бездобавочной смеси на 65 °С.

Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии сырьевой смеси с добавлением криолита демонстрируют еще более раннее начало процесса декарбонизации при температуре немногим ниже 600 °С, сразу после полиморфного перехода оксида кремния. Начало процесса декарбонизации и его окончание характеризуются ступенчатыми ярко-выраженными эндотермическими эффектами 604 °С и 860 °С, что говорит о резком поглощении тепла системой. За счет данных эффектов процесс декарбонизации представляется несколько затянутым примерно до температуры 890 °С. Однако основная часть процесса происходит в узком температурном интервале и отличается высокой скоростью, что

подтверждается кривой термогравиметрии, фиксирующей потерю массы образца (рис. 2).

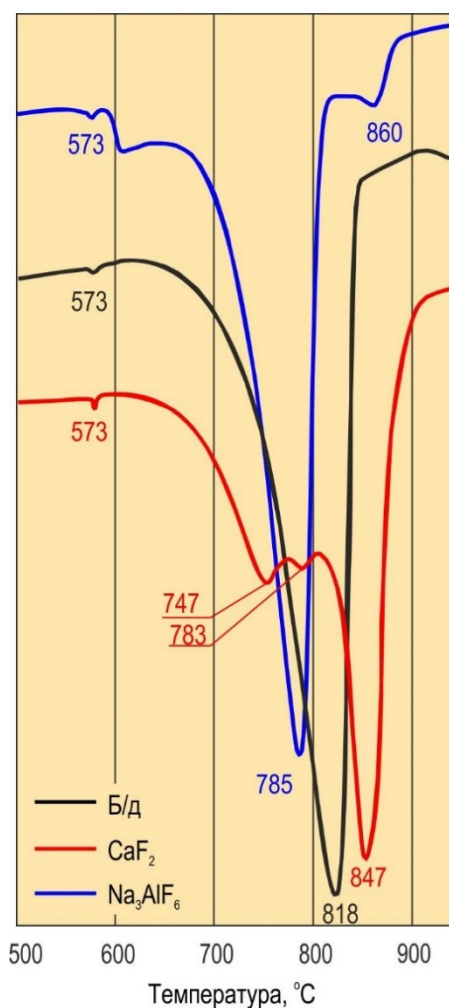


Рис. 1. Кривые ДСК процесса декарбонизации сырьевых смесей

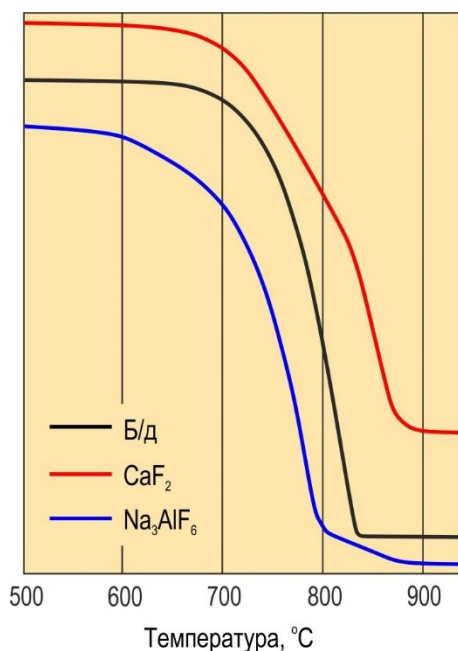


Рис. 2. Кривые потери массы при декарбонизации сырьевых смесей

Изменение процесса выделения углекислого газа с вводом добавок фиксируется не только на кривых термогравиметрии, но и на кривых ионного тока, полученных при определении масс-спектрометром вещества с атомной единицей массы 44 (рис. 3). Масс-спектрометр позволяет более точно определить процесс диссоциации карбоната кальция. Самое раннее начало разложения CaCO_3 наблюдается для сырьевой смеси с криолитом. Кривая ионного тока выхода CO_2 отклоняется от горизонтального участка при температуре около 550 °C. Для сырьевой смеси с добавкой фторида кальция выделение CO_2 фиксируется при температуре около 590 °C. Для бездобавочной сырьевой смеси эта температура составляет 618 °C. Ступенчатое протекание реакции диссоциации карбоната кальция с вводом минерализующих добавок связано с некоторым замедлением процесса, что приводит к появлению пиков на кривых ДСК и ионного тока, а также к изменению скорости протекания реакции, о чем свидетельствует характер изменения кривой ТГ (рис. 2) по сравнению с бездобавочной сырьевой смесью. Именно поэтому процесс декарбонизации заканчивается при более высоких температурах. Как известно, реакция разложения карбоната кальция очень сильно зависит от парциального давления CO_2 над образцом. Чем выше парциальное давление углекислого газа, тем выше температура разложения карбоната кальция. Изменение парциального давления CO_2 над образцом и задержка, в связи с этим, процесса декарбонизации при введении фторида кальция и криолита, скорее всего, связаны с плавлением либо самих добавок, либо промежуточных соединений различного состава, образовавшихся при вводе минерализаторов, которые имеют ограниченный температурный интервал существования, а также невысокие температуры плавления. Появление даже ограниченного количества расплава приводит к затруднению выхода углекислого газа из системы и повышению парциального давления CO_2 над образцом. Именно поэтому происходит ступенчатая диссоциация карбоната кальция с изменением скорости процесса и появлением пиков на кривых ДСК и ионного тока.

В высокотемпературной области кривая ДСК бездобавочной сырьевой смеси имеет два термоэффекта – экзотермический при температуре 1349 °C и эндотермический – при 1392 °C (рис. 4). Экзотермический эффект характеризует образование в системе силикатов кальция, в первую очередь белита C_2S , эндотермический эффект фиксирует появление расплава в системе и образование алита C_3S .

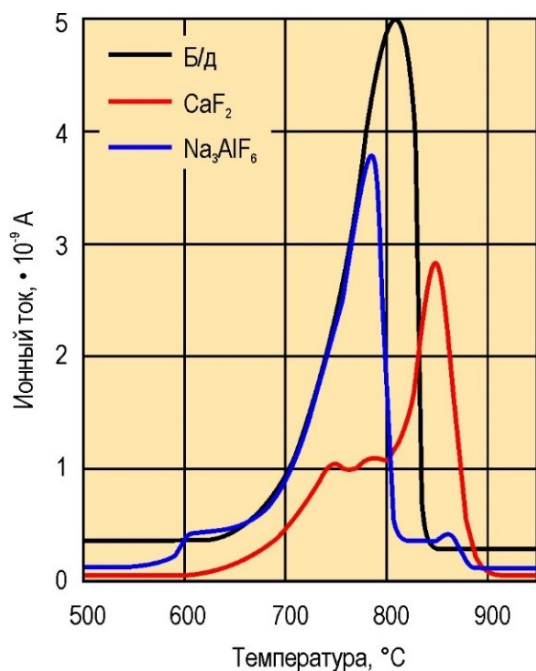


Рис. 3. Интенсивность выделения CO_2 при декарбонизации сырьевых смесей

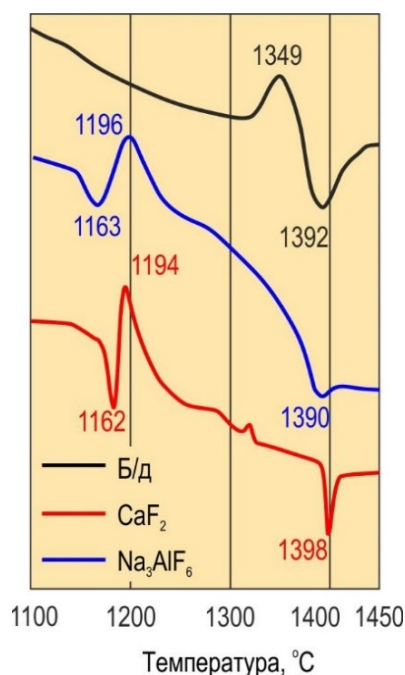


Рис. 4. Кривые ДСК сырьевых смесей высокотемпературной области

Высокотемпературная часть кривой ДСК сырьевой смеси с добавлением фторида кальция отличается двумя термическими эффектами, характеризующими поглощение тепла, которые фиксируются при температурах 1162 °С и 1398 °С и одним термическим эффектом, характеризующим выделение тепла, при температуре 1194 °С (рис. 4). При этом термические эффекты гораздо менее четко выражены по сравнению с бездобавочной смесью. Термический эффект при температуре 1162 °С характеризует, скорее всего, появление жидкой фазы. С появлением жидкой

фазы интенсифицируются процессы взаимодействия оксидов кальция и кремния с образованием силикатов кальция, в первую очередь белита. Об этом свидетельствует экзотермический эффект с вершиной при температуре 1194 °С, а также наличие отражений белита на рентгенограмме при температуре 1200 °С.

При этом стоит отметить, что в интервале температур от 1250 °С до 1380 °С наблюдаются некоторые колебания кривой ДСК. Из этого следует, что сырьевая смесь с добавлением фторида кальция характеризуется как широким температурным интервалом плавления, которое происходит постепенно, захватывая все новые частицы смеси, так и постепенным образованием основных клинкерных минералов, в том числе алита, отражения которого фиксируются на рентгенограмме при 1200 °С. То есть при появлении жидкой фазы, в системе ускоряются процессы синтеза силикатов кальция, но происходит это также постепенно, следовательно, и термоэффекты будут растянутыми и не ярко выраженными. Кроме того, отсутствие ярко выраженных термических эффектов в данной температурной области может быть связано с наложением экзоэффектов образования новых фаз и эндоэффектов образования жидкой фазы.

Область более высоких температур на кривой ДСК сырьевой смеси с добавлением криолита схожа с сырьевой смесью с добавлением CaF_2 и характеризуется наличием трех термоэффектов – эндотермических при 1163 °С и 1390 °С и экзотермического при 1196 °С (рис. 4). Первый эндотермический эффект вызван ранним появлением расплава в системе. Предположительно, так же, как и для сырьевой смеси с добавлением фторида кальция, в данном температурном интервале может происходить плавление ранее образованных промежуточных соединений. Плавление промежуточных веществ в системе интенсифицирует образование силикатов кальция с характерным выделением тепла, которое отмечается на кривой ДСК при температуре 1196 °С. При дальнейшем нагревании при температуре 1390 °С фиксируются затраты тепла в системе на образование дополнительного количества жидкой фазы.

Оценка результатов комплексного-термического анализа и разницы температур при протекании процессов фазообразования, показывает необходимость рассмотрения процесса усвоения свободного оксида кальция в высокотемпературной области процесса. Изучение скорости связывания оксида кальция позволит оценить эффективность действия минерализаторов. Для этого на рисунке 5 приводится сравнение скорости усвоения свободного CaO в сырьевых смесях без

введения добавки и при добавлении фторида кальция и криолита в процессе обжига в температурном интервале от 1100 до 1450 °С.

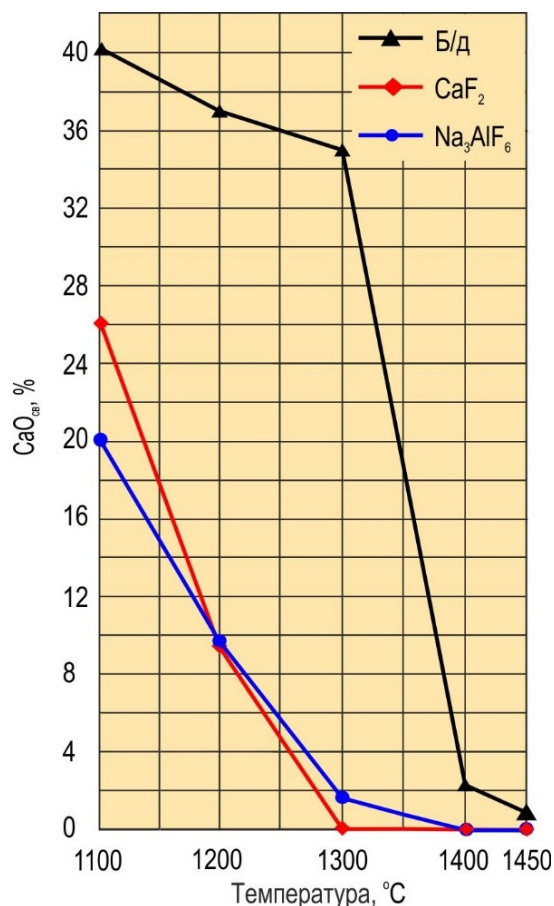


Рис. 5. Кинетика усвоения CaO_{св}

Результаты определения свободного CaO позволяют судить о том, что в клинкере, полученном без использования добавок, оксид кальция полностью не усваивается. В продукте обжига, полученном при 1450 °С, CaO_{св} присутствует в количестве 0,82 %. Наибольшая скорость протекания процесса отмечается в температурном интервале 1300...1400 °С, следовательно, основная часть CaO усваивается в клинкерные минералы до 1400 °С, так как снижение содержания свободного оксида кальция происходит на 33 %. Данные сопоставимы с результатами ДСК, так как при температуре 1349 °С фиксируется экзотермический эффект образования двухкальциевого силиката. При дальнейшем нагревании до температуры 1392 °С в системе образуется расплав, и неусвоенный к этому моменту CaO, взаимодействуя с C₂S, образует фазу трехкальциевого силиката.

При введении добавки происходит существенное увеличение скорости связывания оксида кальция в клинкерные минералы. При вве-

дении в сырьевую смесь минерализатора фторида кальция полное связывание оксида кальция происходит уже при температуре 1300 °С. В температурном интервале 1100...1200 °С наблюдается наибольшая скорость связывания CaO, в продуктах обжига фиксируется снижение количества свободной окиси кальция с 26,1 до 9,4 %, тогда как в бездобавочной смеси скорость усвоения только начинает возрастать.

Использование криолита в качестве минерализующей добавки позволяет интенсифицировать процессы, протекающие при обжиге в интервале температур 1100...1200 °С. При температуре 1100 °С фиксируется наименьшее количество свободного CaO – 20,3 %, которое при достижении температуры 1200 °С снижается до 9,6 %. В температурном интервале от 1200 °С до 1400 °С криолит показывает меньшую эффективность по сравнению с фторидом кальция. В продукте обжига, полученном при температуре 1300 °С, фиксируется 1,7 % неусвоенного оксида кальция. При дальнейшем повышении температуры до 1400 °С происходит полное усвоение оксида кальция. Высокая эффективность криолита в интервале более низких температур по сравнению с фторидом кальция может объясняться высоким содержанием натрия в соединении, который интенсифицирует процессы, протекающие при нагревании сырьевой смеси.

Рентгенофазовый анализ образцов, полученных в результате обжига сырьевых смесей без введения добавки, с вводом фторида кальция, а также криолита, в интервале температур 700–1450 °С с шагом в 100 °С, позволяет полностью проследить изменения, протекающие в фазовом составе смесей при нагревании (рис. 6). Это способствует составлению общей картины, позволяющей оценить степень влияния минерализаторов на процессы клинкерообразования.

Так, для бездобавочной сырьевой смеси при 700 °С наблюдаются дифракционные отражения высокой интенсивности, соответствующие карбонату кальция $d, \text{\AA} = 3,038$, которые полностью исчезают до 900 °С, а также оксида кремния (IV) $d, \text{\AA} = 3,344$, исчезающие при температуре выше 1300 °С. Дифракционные отражения оксида кальция полученного в процессе декарбонизации $d, \text{\AA} = 2,780; 2,407; 1,702$ характеризуются увеличением интенсивности до 1000 °С включительно и дальнейшим ее снижением вплоть до температуры 1450 °С. Эти данные свидетельствуют о невысокой скорости протекания процессов связывания образующегося оксида кальция и оксида кремния (IV).

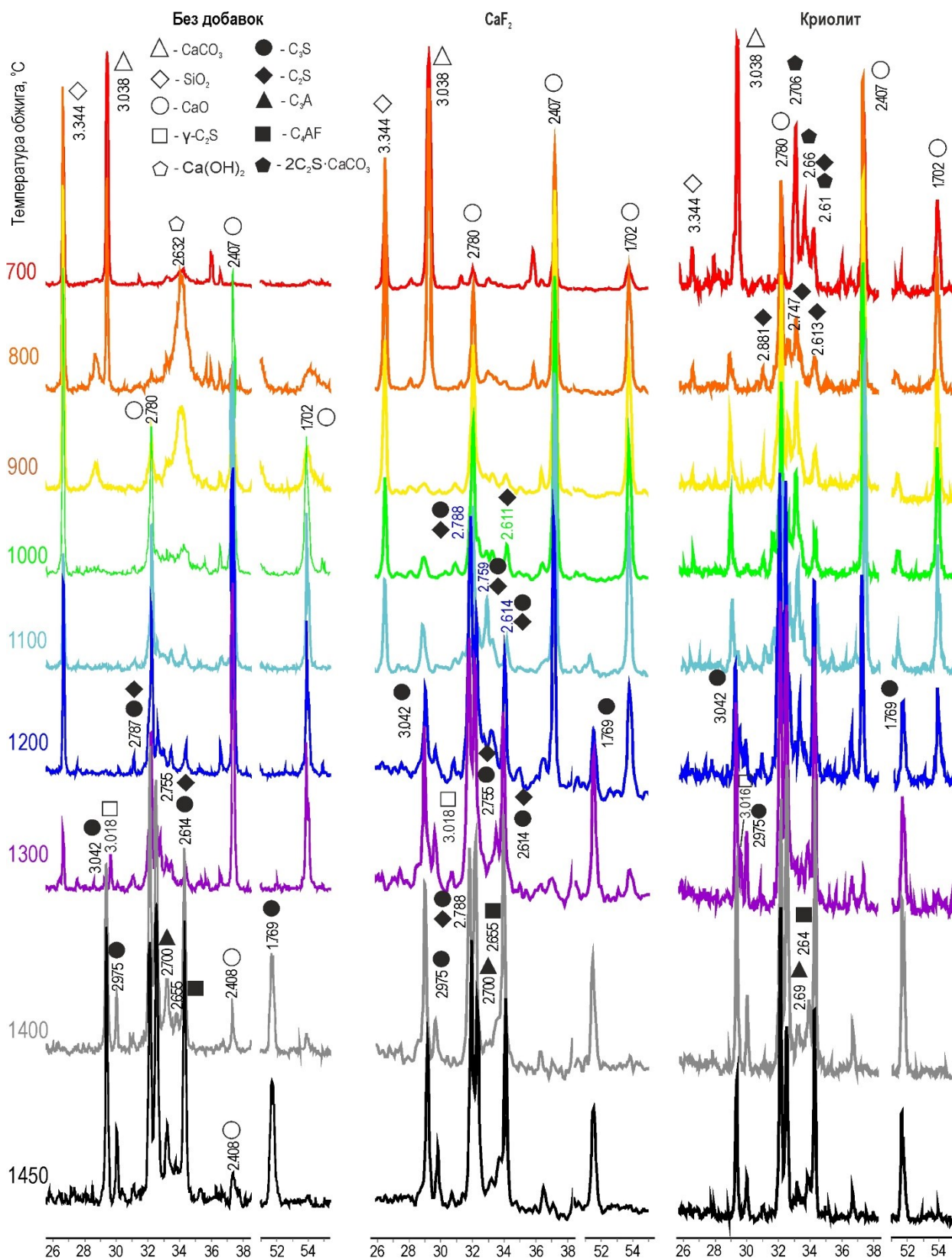


Рис. 6. Изменение фазового состава сырьевых смесей при нагревании

Первые дифракционные отражения характерные для двухкальциевого силиката обнаруживаются на рентгенограмме продукта обжига, полученного при 1200°C, d , Å = 2,787; 2,614. При дальнейшем повышении температуры происходит увеличение данных дифракционных отраже-

ний. Однако при охлаждении образца, полученного при температуре 1300 °С, наблюдалось рассыпание таблетки, что свидетельствует о γ -распаде двухкальциевого силиката. Это подтверждается результатами рентгенофазового анализа, которые позволяют утверждать о наличии дифракционного отражения γ -модификации C_2S

d , Å = 3,018. Однако в процессе охлаждения не весь синтезированный в процессе обжига β - C_2S перешел в γ -модификацию, так как наблюдаются, характерные для него рефлексы d , Å = 2,755; 2,614.

Также при температуре 1300 °С происходит процесс формирования фаз трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита, фиксируются их рефлексы d , Å = 2,700 и d , Å = 2,655 соответственно.

В температурном интервале 1300...1450 °С происходит рост интенсивностей отражений двухкальциевого силиката. По результатам комплексного термического анализа уже известно, что плавление смеси происходит при температуре 1392 °С, что способствует образованию трехкальциевого силиката. Его кристаллизация фиксируется на рентгенограммах продукта обжига, полученного при 1400 °С, на отличительных рефлексах d , Å = 3,042; 1,769. Однако полностью оксид кальция не усваивается, о чем свидетельствует отражение на рентгенограмме с рефлексом d , Å = 2,408 в продукте обжига при температуре 1450 °С. Таким образом, и рентгенофазовый анализ и этилово-глицератный метод подтверждают наличие свободного оксида кальция в клинкере, обожженном без минерализатора, при 1450 °С.

Введение в сырьевую смесь фторида кальция способствует ускорению процесса синтеза на всех его стадиях.

Рентгенограмма продукта обжига, полученного при температуре 700 °С из сырьевой смеси с добавлением CaF_2 , так же, как и из бездобавочной смеси, характеризуется наличием рефлексов высокой интенсивности карбоната кальция d , Å = 3,038 и оксида кремния (IV) d , Å = 3,344. Однако присутствуют и дифракционные отражения оксида кальция d , Å = 2,780; 2,407; 1,702, что свидетельствует о меньшей температуре начала процесса декарбонизации, их интенсивность возрастает до температуры 900 °С включительно и далее снижается вплоть до полного исчезновения при 1300 °С.

При дальнейшем повышении температуры до 900 °С происходит полное исчезновение отражений карбоната кальция, значительное уменьшение интенсивностей отражений оксида кремния (IV), о полном усвоении которого можно утверждать при достижении температуры 1200 °С. Фазовый состав продукта обжига, полученного при температуре 1000 °С, характеризуется появлением дифракционных отражений малой интенсивности двухкальциевого силиката d , Å = 2,611; 2,191 (на рисунке не показан). Аналогичная картина наблюдалась на рентгено-

грамме продукта обжига бездобавочной сырьевой смеси, полученной при температуре на 200 °С выше.

При температуре 1200 °С в составе продукта обжига идентифицируются рефлексы характерные для трехкальциевого силиката d , Å = 3,042; 1,769, а дифракционные отражения двухкальциевого силиката d , Å = 2,780; 2,755; 2,614 имеют достаточно высокую интенсивность. При этом в системе наблюдается одновременное существование, как силикатов кальция, так и свободного оксида кальция при отсутствии неусвоенного оксида кремния, что говорит о неполном формировании основных клинкерных минералов.

Во время охлаждения образца, полученного при температуре 1300 °С, наблюдается процесс γ -распада, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. На рентгенограмме идентифицируется дифракционное отражение малой интенсивности характерное для γ -модификации двухкальциевого силиката d , Å = 3,018. Как и в случае продукта обжига бездобавочной смеси, в фазовом составе присутствует двухкальциевый силикат и β -модификации, рефлексы которого совсем незначительно изменили свою интенсивность по сравнению с результатами анализа продукта при 1200 °С. Отличительным фактором от продукта обжига бездобавочной смеси является присутствие в составе трехкальциевого силиката d , Å = 3,042; 1,769 при одновременном существовании свободного оксида кальция d , Å = 2,407; 1,702.

Результат рентгенофазового анализа образца, полученного при температуре 1400 °С, позволяет судить о полной кристаллизации основных клинкерных минералов и полном усвоении оксида кальция. Последующее повышение температуры будет способствовать перекристаллизации уже сформированной структуры клинкерных минералов.

Как и предполагалось по результатам комплексного термического анализа и исследования усвоения CaO , введение криолита способствует существенной интенсификации процессов, протекающих до 1200 °С, по сравнению с минералообразованием при введении фторида кальция. На рентгенограмме продукта обжига, полученного при температуре 700 °С, фиксируются дифракционные отражения, характерные для оксида кальция d , Å = 2,780; 2,407; 1,702, которые имеют очень высокую интенсивность, почти в 2 раза превосходящую интенсивность аналогичных дифракционных отражений при введении в сырьевую смесь фторида кальция. Рост интенсивности дифракционных отражений оксида кальция продолжается до 800 °С, затем приостанавливается и

интенсивность идет на снижение. Также на рентгенограмме наблюдается присутствие карбоната кальция $d, \text{\AA} = 3,038$ и оксида кремния (IV) $d, \text{\AA} = 3,344$. Побочным продуктом, образующимся при данной температуре, является $2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot \text{CaCO}_3$ – карбонатный спуррит с характерными дифракционными отражениями $d, \text{\AA} = 2,706; 2,66; 2,61$.

Результат рентгенофазового анализа продукта обжига, полученного при температуре 800°C , позволяет судить о почти полной декарбонизации сырьевой смеси: в продукте обжига не идентифицируются дифракционные отражения карбоната кальция или спуррита. Однако по данным комплексного термического анализа выделение углекислого газа продолжается примерно до температуры 890°C . В составе продукта обжига при температуре 800°C начинает образовываться двухкальцевый силикат, интенсивность дифракционных отражений которого $d, \text{\AA} = 2,881; 2,747; 2,613$ возрастает при повышении температуры обжига.

При дальнейшем увеличении температуры обжига до 1100°C происходит связывание высокоактивного CaO и SiO_2 с образованием силикатов кальция, вплоть до полного исчезновения при 1200°C дифракционных отражений оксида кремния.

При температуре 1200°C в системе образуется трехкальцевый силикат, интенсивность дифракционных отражений которого $d, \text{\AA} = 3,042$ и $1,769$ увеличивается при повышении температуры обжига образцов. Так же, как и при температуре 1300°C , в системе фиксируется присутствие γ -модификации двухкальцевого силиката с характерным дифракционным отражением $d, \text{\AA} = 3,016$ при одновременном существовании CaO и C_3S .

При температуре 1400°C продукт обжига можно идентифицировать как полноценный клинкер, характеризующийся наличием всех клинкерных минералов и отсутствием свободного оксида кальция. При дальнейшем повышении температуры будет происходить перекристаллизация сформировавшихся клинкерных фаз.

Таким образом, сопоставляя вышеприведенные данные, можно сказать, что криолит проявляет минерализующий эффект и может быть использован в качестве минерализатора при обжиге клинкера. При этом эффективность действия криолита не уступает эффективности действия фторида кальция, поэтому температура обжига клинкера может быть снижена до 1400°C .

Выводы.

1. Криолит Na_3AlF_6 – основное фторсодержащее соединение техногенного продукта электролитического производства алюминия – проявил себя как минерализатор с высокой эффективностью, не уступающей фториду кальция, следовательно, может быть использован для интенсификации обжига клинкера.

2. Благодаря своему составу криолит проявляет свое интенсифицирующее действие в широком температурном интервале, влияя как на низкотемпературную область обжига – процесс декарбонизации, так и на высокотемпературные процессы – спекание и образование расплава.

3. При обжиге клинкера с использованием добавки криолита происходит смещение процессов клинкерообразования в область более низких температур, снижается температура образования силикатов кальция и расплава на 200°C по сравнению с сырьевой смесью без добавки.

4. При использовании криолита в качестве минерализующей добавки полное усвоение оксида кальция в клинкерные минералы происходит на 50°C раньше, чем при обжиге бездобавочной смеси, что позволит снизить температуру обжига клинкера до 1400°C без потери качества готового продукта.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект № 3/23 «Разработка способа интенсификации процесса синтеза вяжущих материалов на основе использования фторсодержащих соединений».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Da Y., Ting-shu H., Chen S., Minhao W., Yun F. Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 403. 123692. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.123692
2. Wooteck K., Young K., Yoon L., Soo K., Sang H. Effects of Pair-Mineralizer on Burnability of Clinker and Formation of Mineral // Materials Science Forum - MATER SCI FORUM. 2009. 620–622. Pp. 209–212. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.620-622.209.
3. Wei F., Liang W., Huaili Z., Wei C., Xiaomin T., Juan-fang S., Li Q. Study on the Influence of Mineralizer on the Preparation of Calcium Aluminates Based on Infrared Spectroscopy // Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu. 2015. Vol. 35. 1214-7. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2015)05-1214-04
4. Da Y., Ting-shu H., Chen S., Yike L. Utilizing titanium-containing pickling sludge to prepare raw meal for clinker production // Construction and

Building Materials. 2020. Vol. 268. 121216. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121216.

5. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E. M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker // Cement and Concrete Research. 2018. 105. Pp. 72–80. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.01.006

6. Мишин Д.А., Барбанягрэ В.Д., Черкасов А.В. Процессы клинкерообразования в присутствии минерализаторов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2017. 100 с.

7. Черкасов А.В., Мишин Д.А., Перескок С.А. Использование плавикового шпата для увеличения производительности цементной вращающейся печи // Технологии бетонов. 2014. №7. С. 24–25.

8. Yu Li-bo, Gao Xing-kai, Lu Ling-chao, Cheng Xin. The effect of CaF_2 on the synthesis and properties of cement in the "alite-barium-calcium sulfoaluminate cement" system. J. Jinan Univ. Sci. and Technol. 2006. 20. №2. Pp. 108–110.

9. Бахарев М. В., Москаленко А. Н. Искусственный плавиковый шпат и его применение в цементной промышленности. Цемент и его применение. 2016. №2. С. 50–53.

10. Савельев В. Г. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1972. 352 с.

11. Грачмян А.Н., Зубехин А.П., Леонов В.М. Зависимость вязкости жидкой фазы цементного клинкера от катионов минерализаторов // Исследования в области химии и технологии силикатов: ТР. НПИ. Новочеркасск: НПИ, 1970. Т. 202. С. 13–17.

12. Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П. Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента. М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2014. 152 с.

13. Зубехин А.П., Голованова С.П. Белый портландцемент, его роль в архитектурно-строительном дизайне, производство и применение // Цемент и его применение. 2010. № 3. С. 35–37.

14. Макфи Д.Е., Даффи Дон. А., Херфорт Д. Факторы, влияющие на цвет белых портландцементов // Цемент и его применение. 2010. № 3. С. 40–45.

15. Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А. Эффективность использования техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализатора при обжиге портландцементного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 71–80. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-5-71-80

16. Novosyolov A., Ershova Y., Novoselova I., Vasina, Y. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Pp. 251–257. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_32

17. Ларионов Л.М., Кондратьев В.В., Кузьмин М.П. Пути использования углеродсодержащих отходов алюминиевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. №4. С. 139–146. DOI:10.21285/1814-3520-2017-4-139-146

18. Renó Maria, Silva Rogério, Melo Mirian De Lourdes, Bôas Sebastião. An overview of industrial wastes as fuel and mineralizer in the cement industry // Latin American applied research Pesquisa aplicada latino americana = Investigación aplicada latinoamericana. 2014. Vol. 46. Pp. 43–50. DOI:10.52292/j.laar.2016.326.

19. Куликов Б.П., Николаев М.Д., Кузнецов А.А., Баринев В.В., Пыркова И.В. Получение клинкера с использованием минерализатора на основе фторсодержащих отходов // Цемент и его применение. 2010. №2. С. 102–105

20. Мануйлов В.Е., Козлова В.К., Мануйлов Е.В., Малова Е.Ю. Добавки фторуглеродсодержащих отходов алюминиевого производства в клинкере и цементе // Цемент и его применение. 2011. №4. С. 118–121.

Информация об авторах

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дреер Юлия Ивановна, аспирант. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Новоселова Инна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: grebenik_inna@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Левина Юлия Андреевна, аспирант. E-mail: vasinajulia1511@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 29.09.2023 г.

© Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А., 2023

***Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Levina Yu.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

STUDY OF THE MINERALIZING EFFECT OF CRYOLITE AND ITS INFLUENCE ON THE PROCESSES OF CLINKER FORMATION

Abstract. The article discusses the possibility of using cryolite Na_3AlF_6 , the main fluorine-containing compound of a man-made product of electrolytic aluminum production, as a mineralizing additive when burning clinker. A comparative assessment of the effectiveness of cryolite Na_3AlF_6 , as a mineralizer, and calcium fluoride CaF_2 , a substance that has the most effective mineralizing effect, is provided. The influence of mineralizer additives on the processes of dissociation of calcium carbonate, assimilation of free calcium oxide with the formation of silicates, aluminates and calcium ferrites, liquid-phase sintering and clinker formation with the synthesis of basic clinker minerals is considered. The physical and chemical processes that occur when heating raw material mixtures without additives and with the addition of mineralizers – CaF_2 and Na_3AlF_6 – to a clinker sintering temperature of 1450°C are examined in detail. The dynamics of changes in the qualitative phase composition of firing products at various temperatures, ranging from 700°C to the clinker sintering temperature of 1450°C , as well as a quantitative characteristic of the intensity of formation of the main clinker minerals are presented. It has been determined that cryolite has a mineralizing effect and can be used as a mineralizer when burning clinker. The effectiveness of cryolite is comparable to the effectiveness of calcium fluoride, and the burning temperature of clinker can be reduced to 1400°C .

Keywords: mineralizer, cryolite, clinker burning, replacement of calcium fluoride, clinker burning temperature.

REFERENCES

1. Da Y., Ting-shu H., Chen S., Minhao W., Yun F. Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. 123692. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.123692
2. Wooteck K., Young K., Yoon L., Soo K., Sang H. Effects of Pair-Mineralizer on Burnability of Clinker and Formation of Mineral. *Materials Science Forum - MATER SCI FORUM*. 2009. 620–622. Pp. 209–212. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.620-622.209.
3. Wei F., Liang W., Huaili Z., Wei C., Xiaomin T., Juan-fang S., Li Q. Study on the Influence of Mineralizer on the Preparation of Calcium Aluminates Based on Infrared Spectroscopy. *Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu*. 2015. Vol. 35. 1214–7. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2015)05-1214-04
4. Da Y., Ting-shu H., Chen S., Yike L. Utilizing titanium-containing pickling sludge to prepare raw meal for clinker production. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 268. 121216. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121216.
5. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E. M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker. *Cement and Concrete Research*. 2018. 105. Pp. 72–80. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.01.006
6. Mishin D.A., Barbaniagre V.D., Cherkasov A.V. Clinker formation processes in the presence of mineralizers. [Processy klinkeroobrazovaniya v pristutstvii mineralizatorov]. BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod. 2017. 100 p. (rus).
7. Cherkasov A.V., Mishin D.A., Pereskok S.A. The use of fluorspar to increase the productivity of a cement rotary kiln. [Ispol'zovanie plavikovogo shpata dlya uvelicheniya proizvoditel'nosti cementnoj vraschchayushcheysya pechi]. *Concrete technologies*. 2014. No. 7. Pp. 24–25. (rus).
8. Li-bo Y., Xing-kai G., Ling-chao L., Xin C. The effect of CaF_2 on the synthesis and properties of cement in the "alite-barium-calcium sulfoaluminate cement" system. *J. Jinan Univ. Sci. and Technol.* 2006. 20. No. 2. Pp. 108–110.
9. Baharev M.V., Moskalenko A.N. Artificial fluorspar and its application in the cement industry. [Iskusstvennyj plavikovyj shpat i ego primeneniye v cementnoj promyshlennosti]. *Cement and its application*. 2016. No. 2. Pp. 50–53. (rus)
10. Savelev V.G. Chemistry of silicon and physical chemistry of silicates [Himiya kremniya i fizicheskaya himiya silikatov]. M.: MChTI named after D. I. Mendeleev, 1972. 352 p. (rus).
11. Grachan A.N., Zubekhin A.P., Leonov V.M. Dependence of the viscosity of the liquid phase of cement clinker on mineralizer cations [Zavisimost' vyazkosti zhidkoj fazy cementnogo klinkera ot ka-

tionov mineralizatorov]. Research in the field of silicate chemistry and technology: NPI. Novocherkassk: NPI, 1970. Vol. 202. Pp. 13–17. (rus).

12. Zubekhin A.P., Jatsenko N.D., Golovanova S.P. Theoretical Foundations of Whiteness and Coloring of Ceramics and Portland Cement [Teoreticheskie osnovy belizny i okrashivaniya keramiki i portlandtsementa]. M.: OOO Riph "Stroymaterialy". 2014. 152 p. (rus).

13. Zubekhin A.P., Golovanova S.P. White Portland cement, its role in architectural and construction design, production and application [Belyi portlandtsement, ego rol' v arhitekturno-stroitel'nom dizaine, proizvodstvo i primeneniye]. Cement and its application. 2010. No. 3. Pp. 35–37. (rus).

14. Makphi D.E., Daffi Don. A., Kherfort D. Factors Affecting the Color of White Portland Cements [Faktory, vliyayushchie na tsvet belyh portlandtsementov]. Cement and its application. 2010. No. 3. Pp. 40–45. (rus).

15. Novosyolov A., Ershova Y., Novoselova I., Vasina Y. Efficiency of using a man-made product from the electrolytic production of aluminum as a mineralizer when firing Portland cement clinker [Effektivnost' ispol'zovaniya tekhnogenogo produkta elektroliticheskogo proizvodstva al'yuminiya v kachestve mineralizatora pri obzhige portlandtsementnogo klinkera]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 71–80. (rus). DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-5-71-80

16. Novosyolov A., Ershova Y., Novoselova I., Vasina, Y. Efficiency of using a technogenic product

of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker. Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Pp. 251–257. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_32

17. Larionov L.M., Kondratev V.V., Kuzmin M.P. Ways to use carbon-containing waste from aluminum production [Puti ispol'zovaniya uglerodsoderzhashchih othodov alyuminievogo proizvodstva]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. Vol. 21. No. 4. Pp. 139–146. (rus). DOI:10.21285/1814-3520-2017-4-139-146.

18. Renó Maria, Silva Rogério, Melo Mirian De Lourdes, Bôas Sebastião. An overview of industrial wastes as fuel and mineralizer in the cement industry. Latin American applied research Pesquisa aplicada latino americana = Investigación aplicada latinoamericana. 2014. Vol. 46. Pp. 43–50. DOI:10.52292/j.laar.2016.326.

19. Kulikov B.P., Nikolaev M.D., Kuznetsov A.A., Barinov V.V., Pyrkov I.V. Production of clinker using a mineralizer based on fluorinated waste. [Poluchenie klinkera s ispol'zovaniem mineralizatora na osnove ftorsoderzhashchih othodov]. Cement and its application. 2010. No. 2. Pp. 102–105. (rus)

20. Manuilov V.E., Kozlova V.K., Manuilov E.V., Malova E. Yu. Additives of fluorocarbon-containing waste from aluminum production in clinker and cement [Dobavki ftoruglerodsoderzhashchih othodov alyuminievogo proizvodstva v klinkere i cemente]. Cement and its application. 2011. No. 4. Pp. 118–121. (rus)

Information about the authors

Novosyolov, Alexey G. PhD. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dreer, Yulya I. Postgraduate. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Novoselova, Inna N. PhD. E-mail: grebenik_inna@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Levina, Yulia A. Postgraduate. E-mail: vasinajulia1511@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 29.09.2023

Для цитирования:

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А. Исследование минерализующего эффекта криолита и его влияния на процессы клинкерообразования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-82-92

For citation:

Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Levina Yu.A. Study of the mineralizing effect of cryolite and its influence on the processes of clinker formation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-82-92

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ

Аннотация. В представленной статье описана технология топологической оптимизации. Также описываются главные методы топологической оптимизации: ESO/BESO; SIMP-метод; ESO-Simp-метод; Level-Set-метод. Каждый из методов имеет свои достоинства, но обладают общими недостатками, а именно: проблема «шахматной доски» и зависимость от сеточного разбиения. Топологическая оптимизация позволяет снизить вес изделия, с сохранением прочностных характеристик. На основе получившегося после оптимизации изделия были рассмотрены технологии его производства. К ним относятся традиционные технологии (литье, штамповка, фрезеровка и т.д.) и аддитивные технологии производства. Было представлено и описано программное обеспечение, обладающее функционалом топологической оптимизации. В основном это коммерческие CAD/CAE-системы (OptiStruct, Simulia Tosca, ANSYS и MSC Nastran). Основными отраслями, которые используют метод топологической оптимизации являются аэрокосмическая промышленность, машиностроение, медицина, робототехника и другие. В данной работе рассматривается процесс уменьшения веса тележки роботизированной ячейки при помощи метода SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), на которую крепится робот KUKA. Для топологической оптимизации тележки роботизированной ячейки использовался функционал CAD/CAM/CAE-системы NX от компании Siemens PLM Software. Сделаны обобщающие выводы о том, что топологическая оптимизация позволяет получать геометрические формы изделия с минимальной массой при сохранении прочности и жесткости.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, роботизированные комплексы, нагрузки, ограничения, оптимизация, WAVE-связи, навигатор оптимизации.

Введение. Топологическая оптимизация представляет собой технологию для проектирования конструкций различной сложности, путем оптимизации машины с сохранением прочности [1, 2]. Также оптимизацию топологии используют для изучения уникальных физических свойств [3–5].

Самое первое упоминание о технологии топологической оптимизации (ТО) появилось одновременно с методом конечных элементов, то есть в 1960-е годы. Когда промышленность и производство начали набирать обороты в развитии и повышение цены на материалы, люди стали задумываться о снижении массы изделия, с сохранением прочностных характеристик. В этот момент начал стремительно развиваться метод топологической оптимизации. Поэтому за последнее десятилетие ТО стала применяться намного чаще, чем до быстрого развития промышленности и производства в целом. Это связано с тем, что в настоящее время стали предъявлять высокие требования к прочности и жесткости конструкции, с обеспечением минимального веса. Такие требования предъявляются в основном в аэрокосмической отрасли, военной промышленности, медицинской промышленности, строительной промышленности, роботизированных конструкциях и т.д. Такие требования можно

выполнить только с помощью методики топологической оптимизации либо генеративного дизайна.

В настоящее время актуальным направлением применения топологической оптимизации является проектирование роботизированных ячеек. Роботизированные ячейки могут быть различного масштаба и сложности: роботизированные ячейки, роботизированные участки, роботизированные линии. За счет представленного деления усложняется схема и увеличивается масштаб технологического процесса.

Роботизированная ячейка – это низшее звено роботизации. Также ее другое название – это роботизированный технологический комплекс.

Роботизация в промышленности стала применяться в XXI веке и в дальнейшем стала важной составляющей автоматизированного производства. Роботы используются в любой промышленности. Их внедрение в производство помогает сократить брак и издержки, а также повысить производительность и качество выпускаемой продукции. Качество продукции до внедрения промышленных роботов и после различается значительно, так как роботы не устают физически, могут выполнять работу в неблагоприятных условиях. Современные технологии позволяют

роботизированные комплексы снабдить техническим зрением и датчиками движения, что позволяет их адаптировать к внешним условиям работы.

К роботизированным ячейкам предъявляются различные требования, которые регламентированы государственным межотраслевым стандартом (ГОСТ 12.2.072-82):

1. Роботы должны иметь специализированное исполнение своей конструкции, если применяются в условиях повышенной запыленности и температуры воздуха и т.д.

2. Захватное устройство промышленного робота обязано удерживать объект манипулирования при прекращении подачи электричества. Это делается для безопасности человека.

3. Промышленные роботы обязаны оснащаться регуляторами, которые позволяют снижать скорость его исполнительных устройств до минимального значения, в случае, когда в зоне рабочего пространства робота находится обслуживающий персонал.

4. Чтобы обеспечить при работе роботизированной ячейки безопасность оператору, необходимо, чтобы на пульт управления осуществлялся следующий вывод информации:

- режим работы роботизированной ячейки;
- остановка оборудования (блокировка), которая работает в паре с роботом;
- оповещение о сбое работы промышленного робота.

5. Роботизированные ячейки должны быть оборудованы аппаратурой, которая исключает автоматическое включение робота после внезапного прекращения подачи электроэнергии.

6. Необходимо, чтобы роботы проходили требования по шумовым характеристикам.

7. Органы управления роботом и отображаемая информация, должна располагаться на панели управления.

8. Если происходит выбор средств для отображения информации, которая подразумевает немедленное реагирование, то предпочтение отдается звуковым сигналам, так как они считаются наиболее эффективными. Если звуковой сигнал собирается использовать в помещениях, в которых невозможно его распознать из-за рабочего шума, то лучше тогда использовать световой сигнал, который в дальнейшем выбирается по ГОСТ.

9. Переключатели, предназначенные для смены режима, в котором работает робот, должны быть оснащены фиксирующим механизмом, который предотвращает их произвольное перемещение.

10. Механизмы, предназначенные для аварийной остановки роботизированных ячеек,

должны располагаться в легкодоступных местах. Допустим в качестве органа для аварийного отключения от питания будет применяться кнопка, то она должна быть увеличена в размерах, иметь грибовидную форму и окрашена в красный цвет, а также рядом должны располагаться указатели и правила пользования данным механизмом.

11. При организации полноценных роботизированных ячеек, которые находятся на одной огражденной территории и управляются различными пультами, должна стоять система блокировки, которая не позволит управлять одним и тем же пультом сразу несколькими оборудованными, находящимися в рабочей зоне роботизированного комплекса.

12. Расстановка технологического оборудования, входящего в роботизированную ячейку, должно включать корректное расположение оборудования, чтобы обслуживающий персонал при проведении каких-либо необходимых работ (программирование, обучение, ремонт и т.д.) мог свободно и безопасно получить доступ к оборудованию.

13. Перед началом работы, сотрудник или оператор должен проверить роботизированную ячейку на холостом ходу. Это делается для того, чтобы сотрудник убедился в исправности промышленного робота и вспомогательного оборудования или же для исправления неисправностей, которые были замечены работником при испытании роботизированной ячейки. Также необходима проверка блокировочных устройств, которые должны работать в соответствии с гидравлической, пневматической и электрической схемами.

14. Обслуживающему персоналу строго запрещено находиться в пространстве роботизированной ячейки, дабы избежать несчастных случаев, также запрещено выполнять ремонтные работы или обслуживание промышленных роботов без отключения питания.

Методика. Теперь разберем подробнее, что такое топологическая оптимизация и для чего ее используют. До момента появления аддитивных технологий, вопрос по геометрии не являлся такой серьезной проблемой и решался всеми доступными методами [1, 2]. С появлением аддитивных технологий стали стараться уменьшить вес конструкций за счет данной технологии, и так появился метод топологической оптимизации. Он позволяет изменить форму стандартной геометрии на геометрию, которая адаптирована под определенную технологию. Такими технологиями могут являться, как традиционные (литье, штамповка, фрезеровка и т.д.), так и аддитивные технологии [6, 7].

Существует несколько методов топологической оптимизации:

1) ESO/BESO – это эволюционный метод оптимизации (Evolutionary Structural Optimization) и двунаправленной эволюционной оптимизации конструкции (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) [8].

2) SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization) – это метод пенализации для твердого изотропного тела [8].

3) ESO-Simp-метод. Это гибридный метод топологии. Он нацелен на объединение рассмотренных ранее методов ESO и SIMP [8].

4) Level-Set-метод. Его основная цель в том, что данный метод позволяет представить кривую или поверхность в неявном виде [8].

Представленные выше методы имеют различные преимущества, но всех их объединяет несколько недостатков, а именно:

- проблема «шахматной доски»;
- зависимость от сеточного разбиения.

Про каждую проблему можно сказать следующее:

а) Проблема «шахматной доски» состоит в том, что после оптимизации, оптимизированная модель имеет фрагменты, которые находятся на каком-то расстоянии от основной геометрии.

б) Зависимость от сеточного разбиения. Данная проблема появляется в связи с тем, что в расчете используется различные конечные элементы (размер, форма, тип сетки и т.д.), что в конечном итоге приводит к различным дефектам. К сожалению, решения для преодоления данной проблемы еще не придумали [8, 9].

Основная часть. В последние несколько десятилетий топологическая оптимизация превратилась в активное поле для исследователей.

Основной задачей процесса топологической оптимизации и его идеей считается – поиск наиболее подходящего варианта распределения материала в детали из множества итераций, чтобы при дальнейших расчетах не изменились прочностные характеристики детали (рис. 1). Если же говорить простым языком, то использование метода топологической оптимизации при проектировании позволит определить правильное распределение массы детали, при этом сохранив жесткость конструкции и уменьшив ее массу, что повлияет также и на экономическую составляющую [10].

Если смотреть со стороны программного обеспечения, то есть какие программы позволяют использовать данный метод, то в них входит большое количество коммерческих CAD/CAE-систем, а это OptiStruct от Altair HyperWorks, NX от компании Siemens, а также модуль

Simulia Tosca, используемый в Abaqus, ANSYS и MSC Nastran. В современном мире специализированные программы для топологической оптимизации могут создать необходимую деталь с самого нуля. Но в любом случае, программе необходимо задать условия закрепления элемента и указать соприкасающиеся поверхности [11–15].

Большой интерес к данному методу испытывают в отрасли машиностроения, так как можно решить сразу несколько проблем, а именно:

- снижение веса производимых изделий;
- повышение прочности изделий;
- экономическое состояние предприятия,

то есть уменьшение веса позволяет сэкономить на закупках.

Передовые компании во время проектирования стали все чаще применять метод топологической оптимизации.

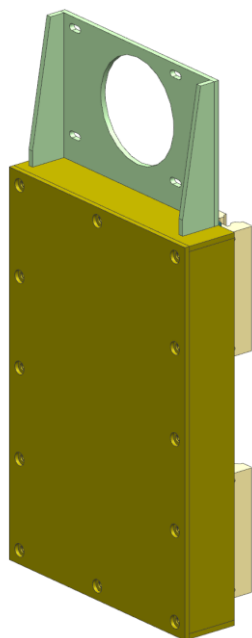
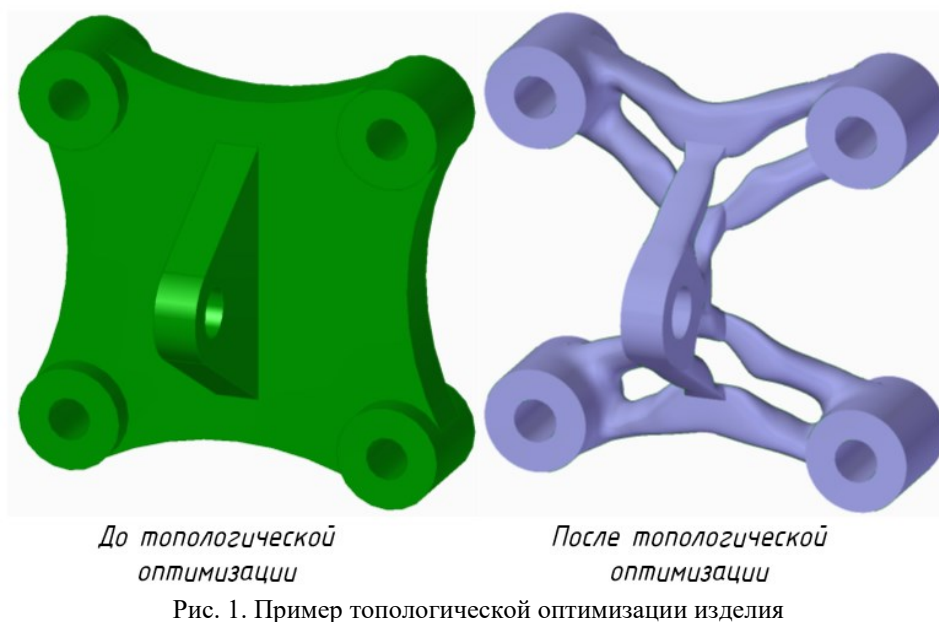
Также основная отрасль, которую нельзя в настоящее время уже представить без данной технологии, это аэрокосмическая промышленность. Там важно получить прочную конструкцию с минимальным весом. В результате топологической оптимизации получается изделие сложной формы, которое производится только в тех случаях, когда это обосновано экономически и стоит задача снижения веса конструкции. Обычно это такие детали, которые нельзя изготовить при помощи применения традиционных методов (точение, фрезерование, штамповка и т.д.), а если можно получить ее с помощью традиционных методов, то выходит экономически невыгодно производить такую деталь, тогда в таких ситуациях переходят к аддитивным технологиям 3D-печати [6, 7, 14, 15].

Основная цель в данной статье состоит в том, чтобы получить топологическую модель тележки, на которую устанавливается робот KUKA [1, 13].

При выполнении топологической оптимизации в данной работе используется CAD/CAM/CAE-система NX. Поскольку после проведения топологической оптимизации предполагается изготовление изделия с помощью сварной конструкции в качестве материала используется СЧ20, имеющая следующие свойства: плотность ($\rho = 7100 \text{ кг/м}^3$); предел кратковременной прочности ($\sigma_B = 200 \text{ МПа}$); модуль упругости ($E = 10^5 \text{ МПа}$); коэффициент Пуассона ($\nu = 0,3$).

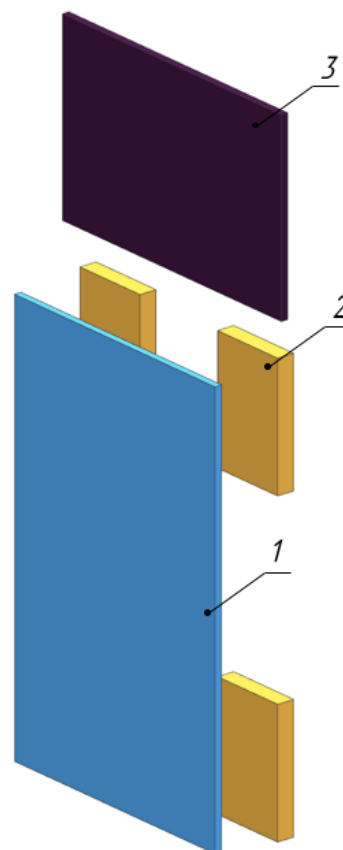
Теперь рассмотрим процесс топологической оптимизации на примере тележки, к которой крепится робот (рис. 2).

Данная конструкция крепится к стенке с помощью кареток, которые в свою очередь устанавливаются на линейные направляющие для перемещения робота в вертикальном положении.



Теперь с помощью редактора геометрической связи WAVE необходимо создать ассоциативную копию всей сборки. После проведения данной операции в дереве построения отображаются забранные геометрические связи (связанное тело).

Следующим этапом в топологической оптимизации является указание геометрии, которую необходимо оставить. На рисунке 3 как раз представлена данная геометрия. Под цифрой 1 указана площадка, которая необходима для установки робота KUKA; цифра 2 – это площадки, к которым будут крепиться каретки, и цифра 3 – площадка под мотор-редуктор.



Следующим этапом выбираем область проектирования. В данном случае это полностью конструкция тележки. После выбора области проектирования необходимо назначить материал (СЧ 20 ГОСТ 1412-85) (рис. 4).

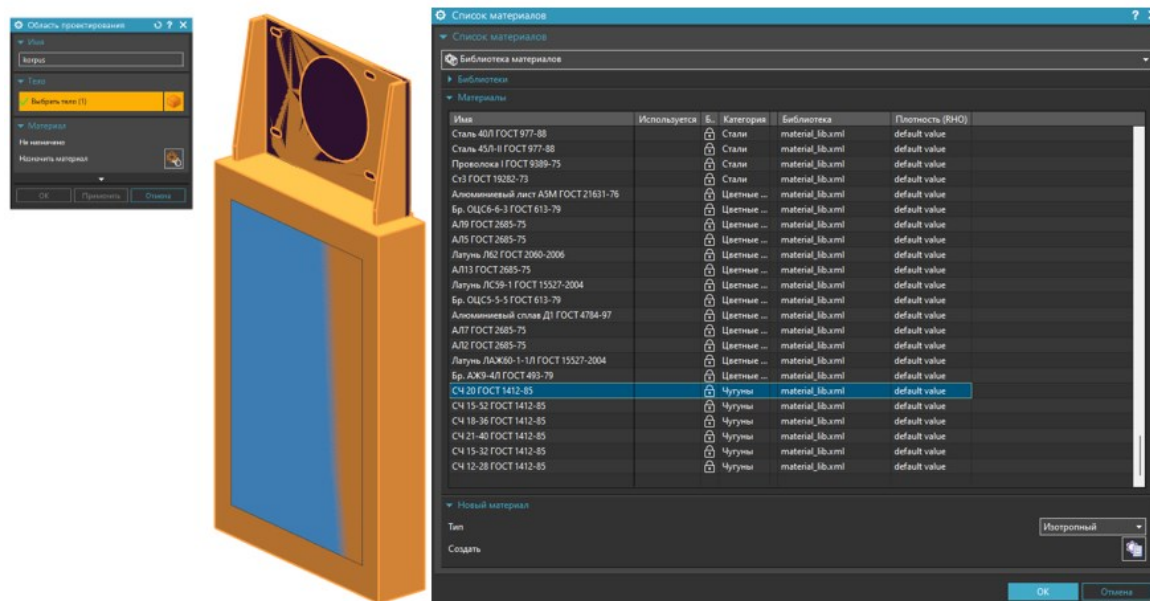


Рис. 4. Выбор области проектирования и назначения материала

Затем необходимо выбрать команду «Тела построения». Это тела, которые были представлены на рисунке 3. На рисунке 5 представлен выбор тела построения с наименованием «ploshadka_robota».

На рисунке 6 показан «Навигатор оптимизации». Там представлен выбор всех тел построений, которые были созданы ранее.

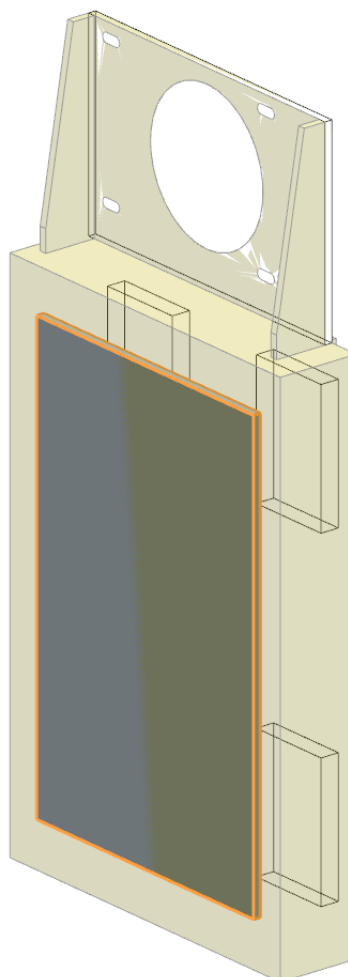
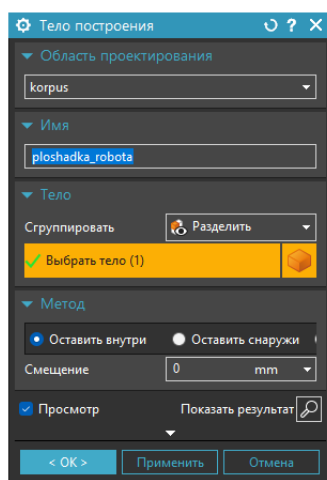


Рис. 5. Выбор тела построения

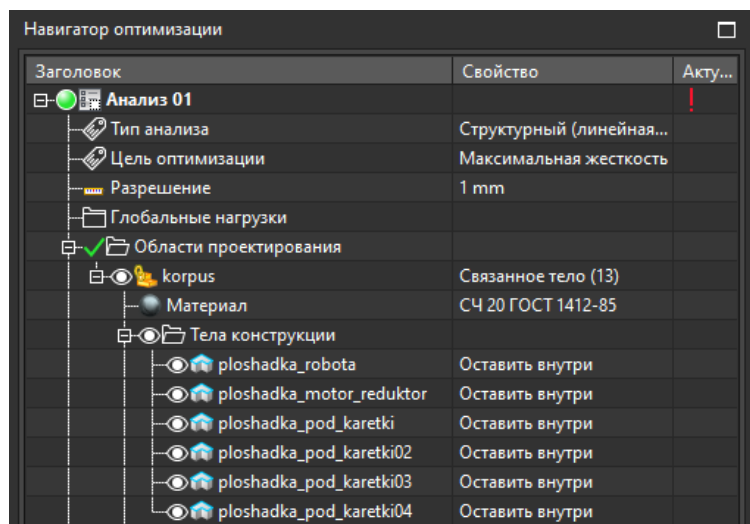


Рис. 6. Навигатор оптимизации

Теперь необходимо задать ограничения. В качестве ограничений будет использоваться команда «Заделка». Это команда, которая фиксирует тело в месте его крепления к основной конструкции. В представленной конструкции заделка задается в местах крепления кареток к корпусу тележки (рис. 7).

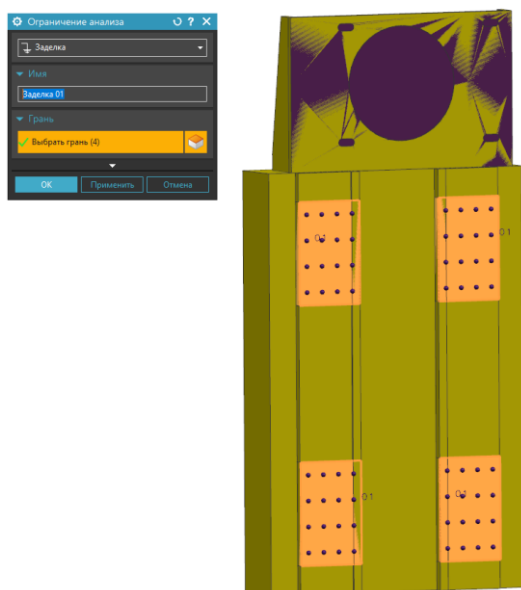


Рис. 7. Фиксация каретки при помощи команды «Заделка»

После создания ограничений необходимо задать силы, действующие на тележку от веса робота и силы (рис. 8). Вес робота, действует на тележку вдоль направления оси – Z.

Затем задаются ограничения оптимизации, то есть в случае проводимой топологической оптимизации необходимо задать ограничения массы, которую не должна превышать конструкция. Представленная тележка не должна превышать массу значением 50 кг (рис. 9).

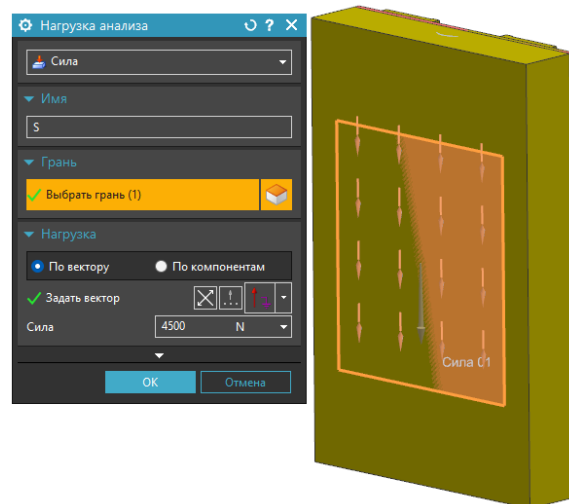


Рис. 8. Задание воздействующих сил

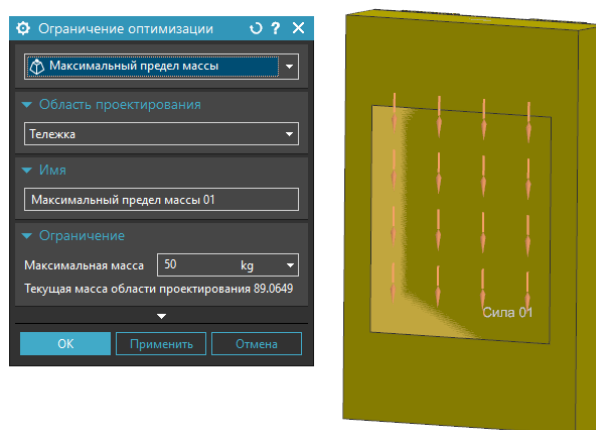


Рис. 9. Ограничения оптимизации

Когда были заданы все необходимые параметры, которые необходимы для процесса топологической оптимизации. Теперь можно начать процесс топологической оптимизации. После его запуска, появится монитор выполнения решений (рис. 10). График, получаемый в этом окне, показывает на сколько будет подходить конструкция по заданным параметрам.

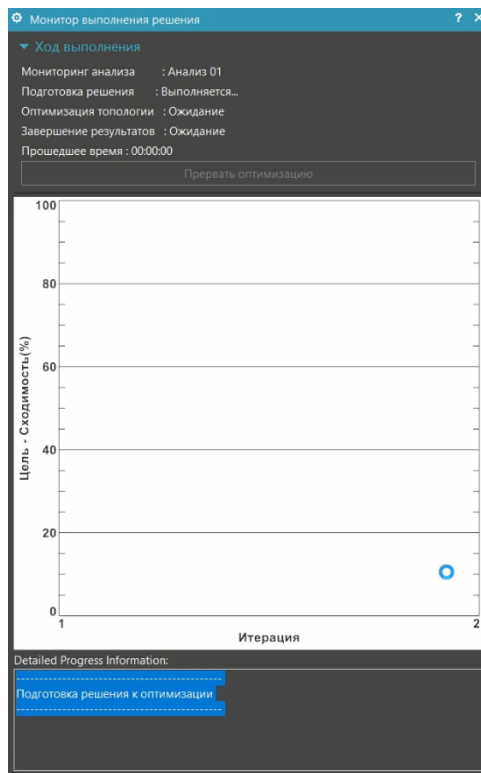


Рис. 10. График получаемых результатов

Так как топологическая оптимизация проводилась в NX, то сразу полученную геометрию можно отредактировать, не загружая полученную геометрию в сторонние программы. Оптимизированная модель приведена на рисунке 11. На основе оптимизированной модели, строится твердотельная модель (3D-модель). На рисунке 12 можно увидеть, как меняется геометрия топологического изделия в зависимости от заданной массы и количества итераций.

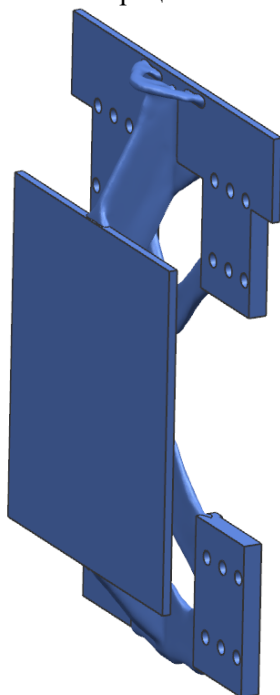


Рис. 11. Пример топологического изделия

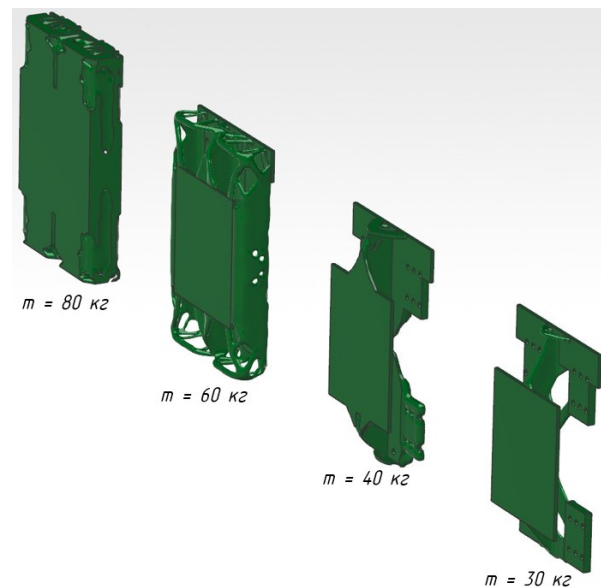


Рис. 12. Изменение вида топологического изделия

После получения облегченной модели, необходимо провести расчет на прочность. Это выполняется для определения влияния уменьшения веса на прочность детали. Расчет будет производиться для начальной модели, которая еще не подвергалась топологической оптимизации и модели уже подверженной топологической оптимизации.

Выводы. Методика топологической оптимизации позволяет снизить массу изделия, но при этом сохраняет жесткостные и прочностные характеристики детали, которая подвержена данному методу. В написанной статье метод топологической оптимизации был продемонстрирован на примере тележки для подвесного робота. Данная сборная конструкция была выбрана из-за того, что требования к роботам и роботизированным ячейкам выросли в разы.

Полученные в статье расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попова Д.Д., Самойленко Н.А., Семенов С.В., Балакирев А.А., Головкин А.Ю. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника.

2018. №55. С. 42–51. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05.

2. Боровиков А.А., Тушев О.Н. Разработка силовой конструкции космического аппарата с использованием топологической оптимизации для двух вариантов технологии изготовления // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9. С. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1807.

3. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Учёные записи ЦАГИ. 2011. Т. XLII. № 2. С. 91–102.

4. Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches a comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. Is. 6, Pp. 1031–1055. DOI:10.1007/s00158-013-0978-6.

5. Кротких А.А., Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №. 01(55). Часть 4. С. 91–94. DOI:10.23670/IRJ.2017.55.071.

6. Masood S.H. Advances in Fused Deposition Modeling // Comprehensive Materials Processing. 2014. №10. Pp. 69–91. DOI:10.1016/B978-0-0.

7. Hazrat Ali Md., Smagulov Z., Otepbergenov T. Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 179. Pp. 55–62. DOI:10.1016/2020.12.008.

8. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №4 (51). С. 51–61. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05.

9. Боровиков А.А., Тененбаум С.М. Топологическая оптимизация переходного отсека КА // Аэрокосмический научный журнал. 2016. №. 05. С. 16–30. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05.

10. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing // Proc. SFF Symp. Austin Texas. 2011. Pp. 348–362.

11. Максимов П.В., Фетисов К.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №. 9(51). Часть 2. С. 58–60. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.05.

12. Kukushkin A.V., Konovalov D.A., Ver-shinin A.V., Levin V.A. Numerical simulation in CAE Fidesys of bonded contact problems on non-conformal meshes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1158. №. 2. Art. 032022. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/3/032022.

13. Cheng L., Liang X., Bai J., Chen Q., Lemon J., To A. On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 27. Pp. 290–304. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.001.

14. Shi G., Guan C., Quan D., Dongtao W.u., Tang L., Gao T. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33 (4). Pp.1252–1259. DOI: 10.1016/j.cja.2019.09.006.

15. Mass Y., Amir O. Topology optimization for additive manufacturing: accounting for overhang limitations using a virtual skeleton // Additive Manufacturing. 2017. Pp. 58–73. DOI: 10.1016/j.addma.2017.08.001.

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Сычёв Евгений Андреевич, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Литвишко Александр Александрович, магистр кафедры «Механическое оборудование». E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 26.09.2023 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А., 2023

**Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: *anciferov.sergey@gmail.com*

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF DESIGN ELEMENTS OF A ROBOTIC CELL

Abstract. *The presented article describes the technology of topological optimization. The main methods of topological optimization are also described: ESO/BESO; SIMP-method; ESO-Simp-method; Level-Set-method. Each of the methods has its advantages, but they have common disadvantages, namely: the problem of the "chessboard" and the dependence on grid partitioning. Topological optimization allows you to reduce the weight of the product, while maintaining the strength characteristics. Based on the product obtained after optimization, its production technologies were considered. These include traditional technologies (casting, stamping, milling, etc.) and additive manufacturing technologies. Software with topological optimization functionality was presented and described. These are mainly commercial CAD/CAE systems (OptiStruct, Simulia Tosca, ANSYS and MSC Nastran). The main industries that use the method of topological optimization are the aerospace industry, mechanical engineering, medicine, robotics and others. In this paper, we consider the process of reducing the weight of a robotic cell trolley using the SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) method, on which a robot KUKA is attached. The functionality of the CAD/CAM/CAE-system NX from Siemens PLM Software was used for the topological optimization of the robotic cell trolley. Generalizing conclusions are made that topological optimization makes it possible to obtain geometric shapes of a product with a minimum mass while maintaining strength and rigidity.*

Keywords: *Topological optimization, robotic complexes, loads, constraints, optimization, WAVE-link, optimization navigator.*

REFERENCES

1. Popova D.D., Samoylenko N.A., Semenov S.V., Balakirev A.A., Golovkin A.Yu. Application of the topological optimization method to reduce the weight of a structurally similar aircraft gas turbine pipeline bracket engine [Primenenie metoda topologicheskoy optimizatsii dlya umen'sheniya massy konstruktivno podobnogo kronshtejna truboprovoda aviacionnogo gazoturbinnij dvigatel']. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2018. No. 55. Pp. 42–51. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)
2. Borovikov A.A., Tushev O.N. Development of the power structure of a spacecraft using topological optimization for two variants of manufacturing technology [Razrabotka silovoj konstrukcii kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem topologicheskoy optimizatsii dlya dvuh variantov tekhnologii izgotovleniya]. Engineering Journal: Science and Innovation. 2018. No. 9. Pp. 1–13. DOI:10.18698/2308-6033-2018-9-1807. (rus)
3. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. Algorithms for optimizing the topology of power structures [Algoritmy optimizatsii topologii silovykh konstrukcij]. Scientific notes of TsAGI. 2011. Vol. XLII. No. 2. Pp. 91–102. (rus)
4. Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches a comparative review. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. Is. 6. Pp. 1031–1055. DOI:10.1007/s00158-013-0978-6.
5. Krotkikh A.A., Maksimov P.V. Research and modification of the SIMP topological optimization method [Issledovanie i modifikatsiya metoda topologicheskoy optimizatsii SIMP]. International Research Journal. 2016. No. 01(55). Part 4. Pp. 91–94. DOI:10.23670/IRJ.2017.55.071. (rus)
6. Masood S.H. Advances in Fused Deposition Modeling. Comprehensive Materials Processing. 2014. No. 10. Pp. 69–91. DOI:10.1016/B978-0-0.
7. Hazrat Ali Md., Smagulov Z., Otepbergenov T. Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis. Procedia Computer Science. 2021. Vol. 179. Pp. 55–62. DOI:10.1016/2020.12.008.
8. Bashin K.A., Tursunov R.A., Semenov S.V. Topology optimization methods for structures used in the aerospace industry [Metody topologicheskoy optimizatsii konstrukcij, primenyayushchiesya v aerokosmicheskoy otrasli]. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2017. No. 4 (51). Pp. 51–61. DOI:10.15593/2224-9982/2017.51.05. (rus)
9. Borovikov A.A., Tenenbaum S.M. Topological optimization of the transition compartment Spacecraft [Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka kosmicheskie apparaty]. Aeronautical and Rocket Space Engineering, 2016. No. 05. Pp. 16–30. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)
10. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. Proc. SFF Symp. Austin Texas. 2011. Pp. 348–362.
11. Maksimov P.V., Fetisov K.V. Analysis of methods for finalizing the finite element model after topological optimization [Analiz metodov dorabotki konechno-elementnoj modeli posle topologicheskoy optimizatsii]. International Research Journal. 2016. No. 9(51). Part 2. Pp. 58–60. DOI:10.15593/2224-9982/2018.55.05. (rus)

12.Kukushkin A.V., Konovalov D.A., Ver-shinin A.V., Levin V.A. Numerical simulation in CAE Fidesys of bonded contact problems on non-conformal meshes. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1158. No. 2. Art. 032022. DOI:10.1088/1742-6596/1158/3/032022.

13.Cheng L., Liang X., Bai J., Chen Q., Lemon J., To A. On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. Additive Manufacturing. 2019. Vol. 27. Pp. 290–304. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.001.

14.Shi G., Guan C., Quan D., Dongtao W.u., Tang L., Gao T. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33 (4). Pp.1252–1259. DOI:10.1016/j.cja.2019.09.006.

15.Mass Y., Amir O. Topology optimization for additive manufacturing: accounting for overhang limitations using a virtual skeleton. Additive Manufacturing 18. 2017. Pp. 58–73. DOI:10.1016/j.addma.2017.08.001.

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Sychev, Evgeniy A. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Litvishko Alexander Alexandrovich. Master of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 26.09.2023

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А. Топологическая оптимизация элементов конструкции роботизированной ячейки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. Topological optimization of design elements of a robotic cell. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112

¹Дуганов В.Я., ¹Дуюн Т.А., ^{1,*}Чуев К.В., ¹Архипова Н.А., ¹Кравченко В.М., ²Чуева Ю.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: kirill.chuev@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Аннотация. В данной статье представлен один из вариантов решения проблемы утилизации изношенных крупногабаритных шин. Проблема утилизации крупногабаритных шин остро стоит при эксплуатации большегрузного автотранспорта в горнодобывающей и строительной отраслях. Отработанные шины должны быть утилизированы в соответствии с законодательством РФ. Одним из этапов утилизации является извлечение металлического корда из шины. Традиционные установки, использующие для развития усилия гидроцилиндры, имеют в этом случае ряд ограничений в применении, связанных с высокой стоимостью и необходимостью большой производственной площади. Авторами предложена конструкция установки для удаления металлического корда из боковой части шины, в которой для развития усилия используется механизм, включающий качающуюся платформу, зубчатые рейки, зубчатые колеса, подвижную каретку и другие элементы. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования для определения основных технологических параметров установки. Предложенная установка является эффективным и экономически выгодным решением, ее использование позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду и сэкономить ресурсы.

Ключевые слова: оборудование для утилизации резино-технических изделий (РТИ), переработка шин, крупногабаритные шины (КГШ).

Введение. Предприятия горнодобывающей и строительной отрасли, эксплуатирующие большегрузный автотранспорт, испытывают острую проблему хранения и утилизации изношенных шин. Обязательная утилизация отработанных шин прописана в Федеральном Законе №89-ФЗ, ст. 12 п. 8. Проблема утилизации шин связана с отсутствием отечественного оборудования для переработки крупногабаритных шин и высокой стоимостью такого оборудования зарубежных производителей [1–4].

Анализ состояния современных предприятий по переработке шин позволяет сделать вывод о том, что они имеют ограничения своих производственных мощностей из-за отсутствия отечественного оборудования для переработки крупногабаритных шин [5–9].

Оборудование для переработки крупногабаритных шин и шин грузового автотранспорта должно учитывать особенности конструкции, зависящие от страны производителя. Шины, произведенные в России и странах СНГ, имеют заметные отличия от зарубежных аналогов.

Шины, произведенные за рубежом, имеют, как правило, радиальную конструкцию корда цельнометаллического типа, армирующую функцию выполняет тонкая стальная проволока. Основными компонентами в таких шинах являются резина и металл, что упрощает конструкцию оборудования для измельчения, так как стальная проволока легко отделяется от резинового корда при помощи магнитных сепараторов.

Большинство шин, производимых на территории России и стран СНГ, являются радиальными со смешанным типом корда. Это шины легковых автомобилей, шины грузовиков, троллейбусов, автобусов и спецтехники. В каркасе покрышки помимо тонкой стальной проволоки присутствует большое количество нейлонового тканевого корда. При измельчении покрышек смешанного типа нити тканевого корда распушаются, цепляются за дробленную металлическую проволоку и удерживают дробленую резиновую крошку, что усложняет процесс измельчения покрышек.

Помимо радиальной конструкции шин смешанного типа в РФ изготавливается большое количество шин диагональной конструкции с текстильным типом корда. В основном они применяются для специальной техники. Использование только тканевой нити в корде такой покрышки обусловлено ее меньшей массой по сравнению с покрышкой, выполненной с цельнометаллической конструкцией корда.

Отечественные производители оборудования по переработке крупногабаритных шин не готовы в настоящее время к производству технологических комплексов по переработке шин, используемых на автотранспорте горнорудных предприятий России. Имеющиеся в регионе предприятия по переработке шин не имеют достаточно мощного производственного оборудования, которое бы позволило перерабатывать шины размером до 59/80R63 (шины от карьерных самосвалов БелАЗ или Komatsu). Максимально допустимый типоразмер перерабатываемых шин

ограничен возможностями традиционно используемой линии по переработке шин Тольяттинского завода. На этой линии возможна переработка следующих типоразмеров шин – 9,00R20 (шина от ЗиЛа), 10.00 R20 (шина от КАМАЗА) и их модификации [10–11].

Основная часть. Авторами статьи ведутся инициативные работы по созданию отечественного оборудования для переработки шин карьерного автотранспорта. При разработке такого технологического комплекса основная проблема возникает на стадии извлечения бортового кольца шины, которое имеет сечение до нескольких десятков квадратных миллиметров.

Шина карьерного самосвала весит до 5 тонн, что позволяет получить при переработке порядка 4 тонн качественной резиновой крошки и 200 кг высоколегированной стали, которые могут с успехом использоваться на предприятиях в качестве сырья. При этом основную массу металла составляют бортовые кольца шин, извлечение которых из изношенных крупногабаритных шин представляет достаточно сложную техническую задачу [12].

На решение этой задачи направлена полезная модель «Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации» (рис. 1) [13].

Предлагаемое оборудование – установка для удаления металлического корда из боковой части шины при утилизации содержит раму 1, на которой шарнирно закреплена одним краем качающаяся платформа 2. Второй край качающейся платформы 2 связан с рамой 1 двумя подъёмными гидроцилиндрами 3. На верхней плоскости качающейся платформы 2 закреплены две зубчатые рейки 4, в зацеплении с которыми находятся два приводных зубчатых колеса 5 подвижной каретки 6. На нижней плоскости качающейся платформы 2 закреплены направляющие 7, в контакте с которыми находятся упорные ролики 8 подвижной каретки 6. Зубчатые колёса 5 приводятся во вращение за счёт привода подвижной каретки 6, состоящего из регулируемого электродвигателя 9 и кинематически связанного с ним червячного редуктора 10.

К подвижному краю качающейся рамы 2 жёстко прикреплена упорная плита 11, через отверстие которой проходит рабочий зуб 12, жёстко закреплённый на подвижной каретке 6.

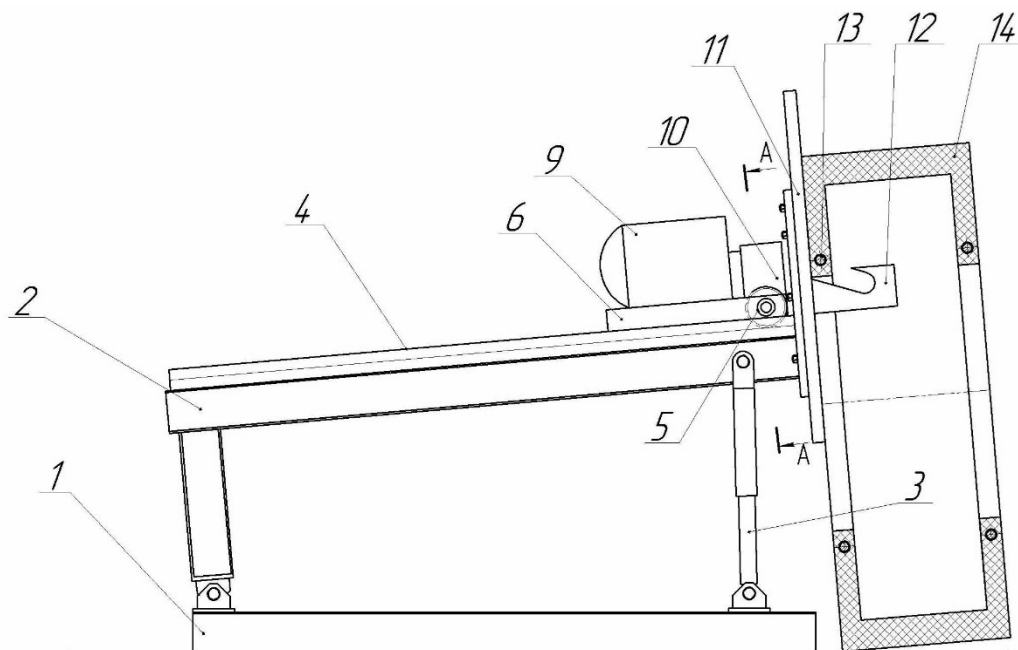


Рис. 1. Общий вид установки для удаления троса из боковой части шины

Устройство работает следующим образом. Качающаяся платформа 2 подъёмными гидроцилиндрами 3, шарнирно закреплёнными на раме 1, устанавливается на требуемую для данного типоразмера шин высоту таким образом, чтобы рабочий зуб 12 находился на уровне верхней точки кольца металлического корда. Оператор устанавливает шину, опирая её обрабатываемой стороной на упорную плиту 10, поднимает качающуюся

платформу 2 до надёжного зацепления рабочего зуба 12 за верхнюю точку внутреннего диаметра шины с кордом и включает электродвигатель 8 привода перемещения подвижной каретки 6. Кинематически связанный с электродвигателем 8 червячный редуктор 9 передаёт крутящий момент на зубчатые колёса 5, находящиеся в зацеплении с зубчатыми рейками 4. Рейки закреплены на верхней плоскости качающейся платформы 2. На нижней плоскости качающейся

платформы 2 закреплены направляющие 7. При перемещении подвижной каретки 6 по направляющим 7 качающейся платформы 2 упорными роликами 10 обеспечивается надёжное зацепление зубчатых реек 4 и приводных зубчатых колёс. За счёт передачи зубчатые колёса 5-зубчатые рейки 4 подвижная каретка 6, жёстко связанная с ней рабочим зубом 12 прижимает шину к упорной

плите 11. По мере перемещения подвижной каретки 6 с рабочим зубом 12 происходит постепенное извлечение из шины кольца металлического корда. После полного удаления кольца каретка возвращается в исходное положение.

При разработке технического проекта установки первоочередной задачей явилось определение её кинематических и энергосиловых характеристик [14, 15].

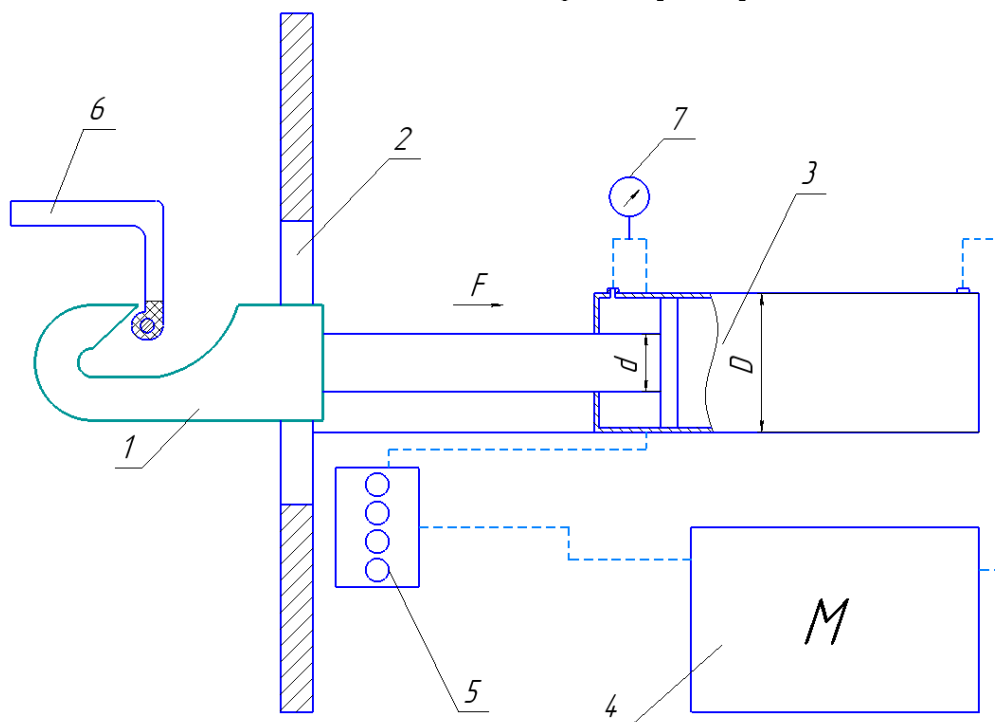


Рис. 2. Принципиальная схема гидродергивателя бортового кольца

Методика проведения эксперимента. Для определения необходимого усилия при извлечении бортового кольца из борта крупногабаритной шины проведен промышленный эксперимент с использованием специального оборудования, принципиальная схема которого изображена на рис. 2. Принцип работы устройства состоит в следующем: масляная станция 4 при помощи пульта управления 5 подает масло в гидроцилиндр 3, возникает избыточное давление на штоке поршня, крюк 1 приходит в движение и извлекает бортовое кольцо из борта шины 6, установленной вплотную к мишени 2. В качестве устройства для измерения давления в рабочей полости гидроцилиндра 7 использовался манометр ДМ02-100-1-М Кл 1.5, устанавливается на входе масла в гидроцилиндр. Диапазон показаний 0–250 кгс/см² (0–25 МПа), погрешность измерения $1,5 \pm 1,5$ кгс/см². Гидроцилиндр имеет внутренний диаметр $D=190$ мм и диаметр штока $d=140$ мм.

Эксперимент проводился с использованием крупногабаритной шины с цельнометаллическим радиальным кордом 265/70 R 19.5. Характеристики шины: ширина профиля шины составляет

265 мм, внешний диаметр равен 870 мм, площадь бортового кольца S_k равна 175 мм², а площадь борта S_b равна 1200 мм² (рис. 3).

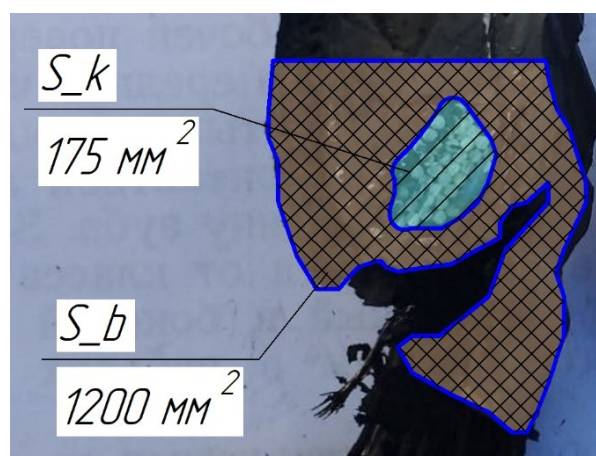


Рис. 3. Основание борта шины 265/70 R 19.5

На рис. 4 представлены характерные временные этапы извлечения бортового кольца при проведении эксперимента с фиксацией показаний измерительного устройства в разные моменты времени.

Рабочим давлением на холостом ходу гидроцилиндра ($t = 0$ с) является значение 80 кгс/см^2 (рис. 4, а). В начале работы установки возникает скачок рабочего давления (130 и 120 кгс/см^2) из-за нагнетания масла в рабочую область гидроцилиндра при извлечении бортового кольца из резинового слоя борта (рис. 4, б). При достижении необходимого для извлечения усилия рабочее давление выравнивается (100 и 110 кгс/см^2) (рис. 4, в), так как площадь среза

практически не изменяется во время всего процесса удаления кольца. Равнодействующая сила, необходимая для осуществления процесса извлечения, приложена в точке, расположенной на оси гидроцилиндра. Далее рабочее давление постепенно возрастает к завершению процесса удаления (120 и 130 кгс/см^2) (рис. 4, г), на окончательной стадии после полного удаления бортового кольца давление резко падает до значений холостого хода (80 кгс/см^2) (рис. 4, д).

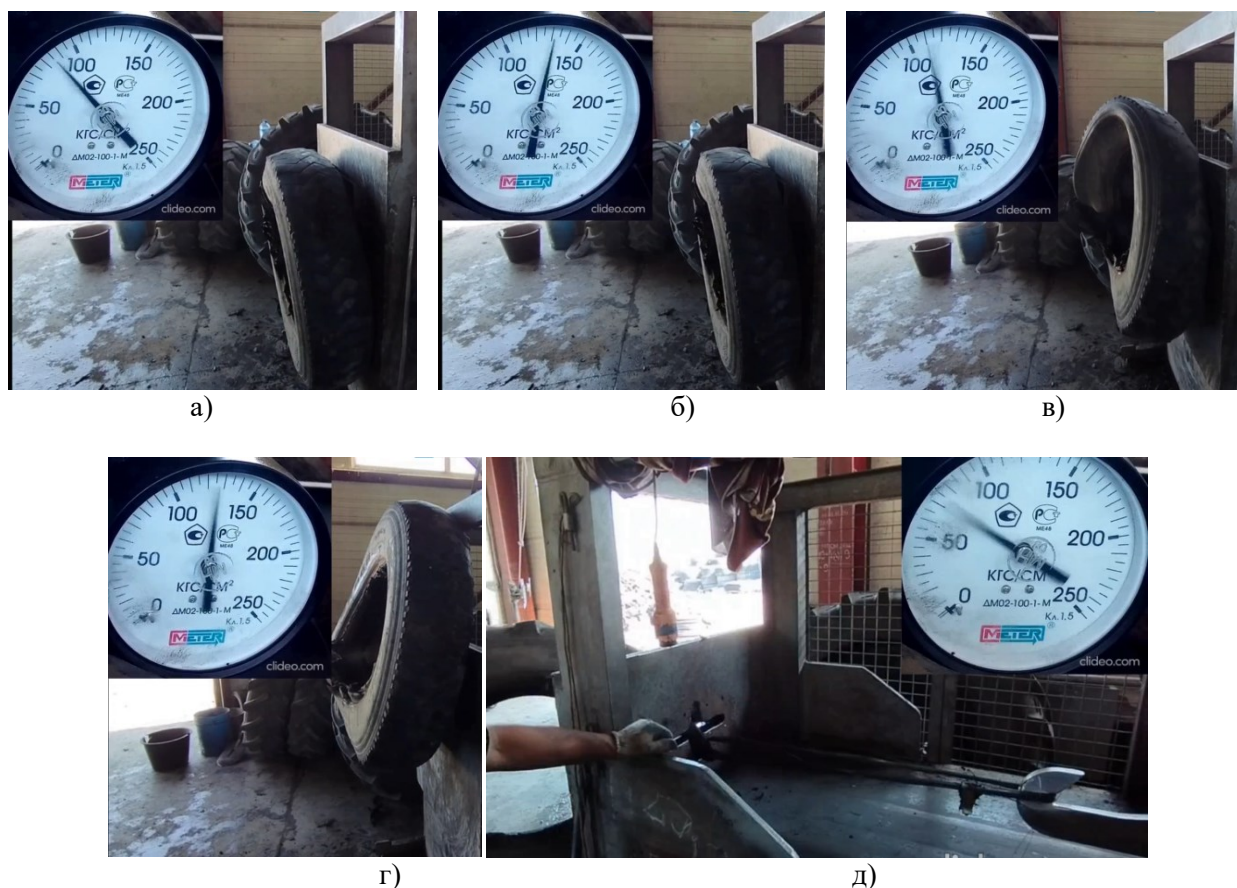


Рис. 4. Проведение эксперимента по извлечению бортового кольца из шины 265/70 R 19.5 в разные моменты времени: а – начальный момент времени ($t = 0$ с); б – скачок рабочего давления при начале работы установки ($t = 1$ с); в – плато значений рабочего давления ($t = 3\text{--}12$ с); г – возрастание давление при завершении рабочего процесса ($t = 12\text{--}14$ с); д – холостой ход ($t = 15$ с)

Полученные данные представлены в виде диаграммы (рис. 5), на которой изображена зависимость рабочего давления в гидроцилиндре от времени. Анализируя диаграмму можно сделать о том, что пиковые значения рабочего давления в гидроцилиндре возникают в начале процесса извлечения бортового кольца из шины и при его завершении. Разберем оба варианта возникновения пиковых значений поподробнее.

Пик рабочего давления на начальном этапе (130 и 120 кгс/см^2) обусловлен необходимостью разрезания кромками бортового кольца шины резинового борта в первоначальный период времени с последующим разрывом сечения борта по

кольцевому участку, ограниченному внутренним и внешним диаметрами стального бортового кольца – металлического корда.

Пиковое значение при завершении работы установки обусловлено тем, что в процессе извлечения бортового кольца шина изменяет свое исходное положение, теряет опорный контакт, что увеличивает нагрузку на крюк установки. Помимо этого, на завершающем этапе работы увеличивается площадь среза резинового борта из-за уменьшения расстояния между двумя точками извлекаемого корда.

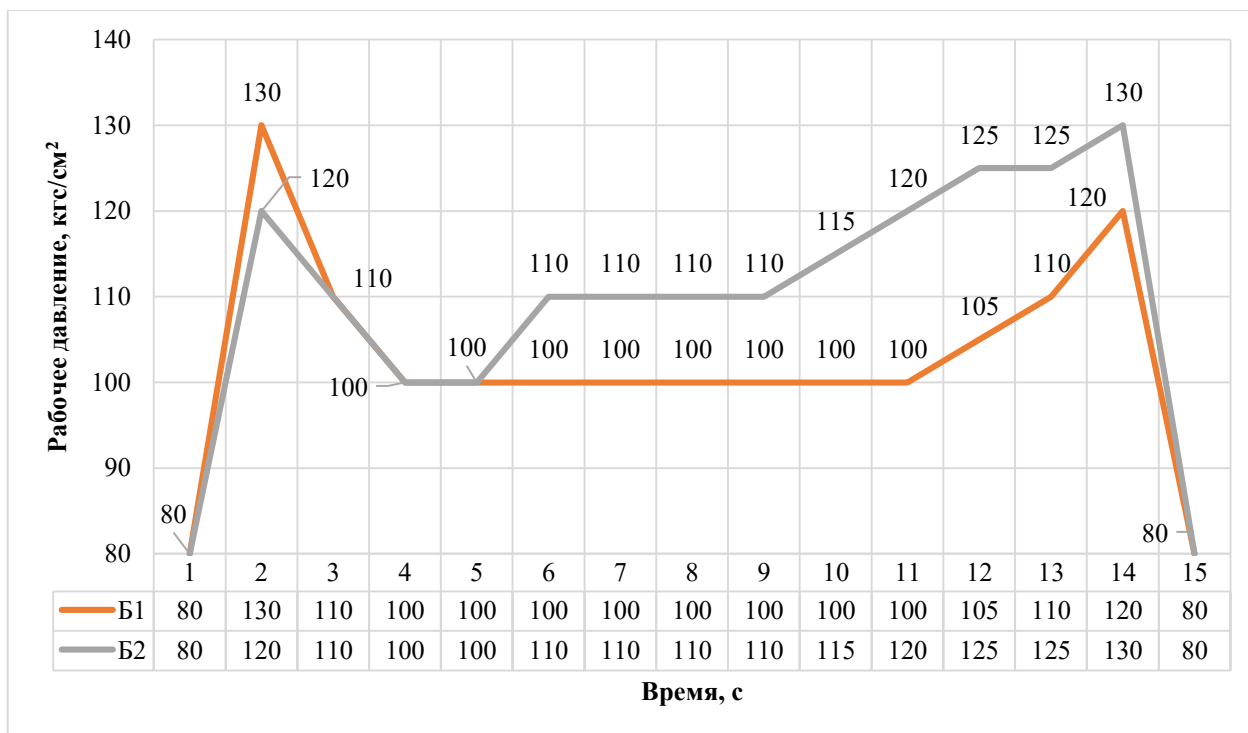


Рис. 5. Диаграмма процесса вырывания бортового кольца из грузовой шины

Для определения усилия, развиваемого гидравлическим цилиндром при обратном ходе, используют следующее выражение:

$$F = P \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (1)$$

где P – рабочее давление гидросистемы; D – внутренний диаметр поршня; d – диаметр штока.

Максимальное рабочее давление 130 кгс/см² (12,75 МПа) в гидроцилиндре возникает в моменты начала работы установки (Б1) и перед её завершением (Б2). Согласно выражению 1 усилие, необходимое для полноценного извлечения бортового кольца из шины 265/70 R 19.5, будет следующим:

$$F = 12.75 \cdot 10^6 \frac{\pi(190^2 - 140^2) \cdot 10^{-6}}{4} = 165110 \text{ Н} = 165.1 \text{ кН}. \quad (2)$$

По аналогичной методике были выполнены эксперименты для других типоразмеров шин, характеристики шин и результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики шин при проведении эксперимента по выдергиванию бортового кольца

№	Шина	s, мм	d, мм	P _{max} , кгс/см ²	P _{max} , МПа	F, кН
1	265/70 R19.5	265	871	130	12,75	165,1
2	315/70 R22.5	315	1024	150	14,71	190,6
3	11.00 R20	285	1080	160	15,69	203,4
4	14.00-20 Я-307	360	1220	190	18,63	241,5

Для подбора электродвигателя установки, описанной выше, необходимо определить требуемое технологическое усилие для извлечения кольца из борта изношенной крупногабаритной шины.

На рис. 7 изображено основание борта такой шины с размерами: площадь 4-х бортовых колец

S_k равна 10700 мм², а площадь борта S_b равна 33150 мм².

Интерполируя усилие, необходимое для извлечения бортового кольца из крупногабаритной шины диаметром 2000 мм (например: 21.00-35 БЕЛ-51 Е-4), получим 406,8 кН.

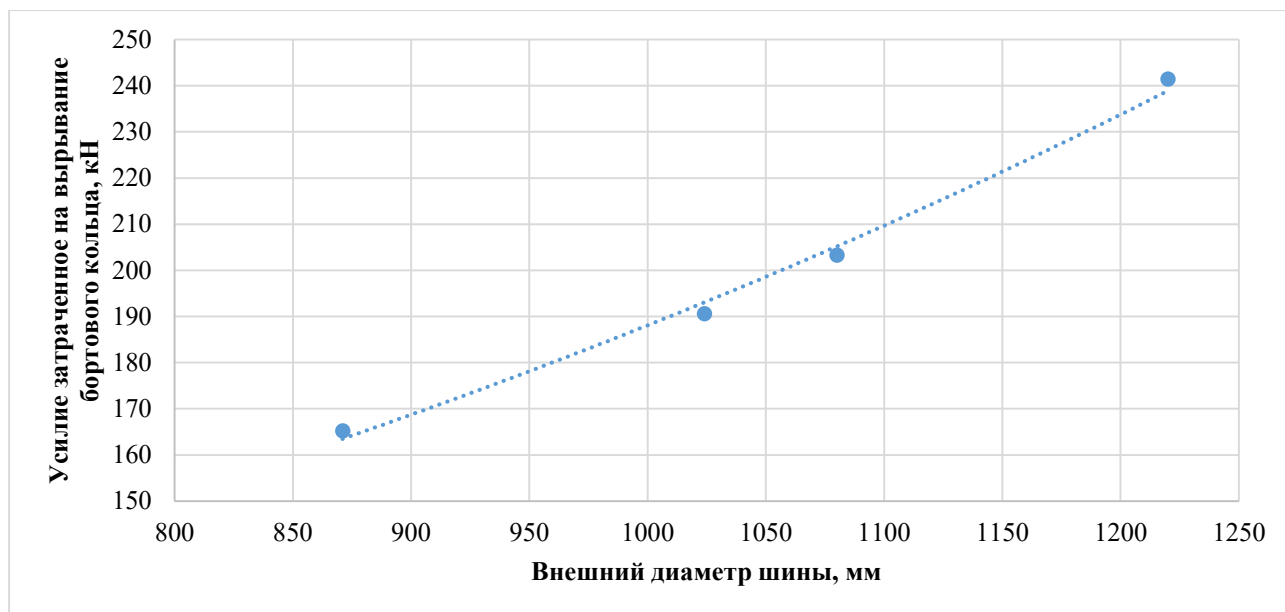


Рис. 6. Зависимость силы, необходимой для извлечения бортового кольца, от внешнего диаметра шины

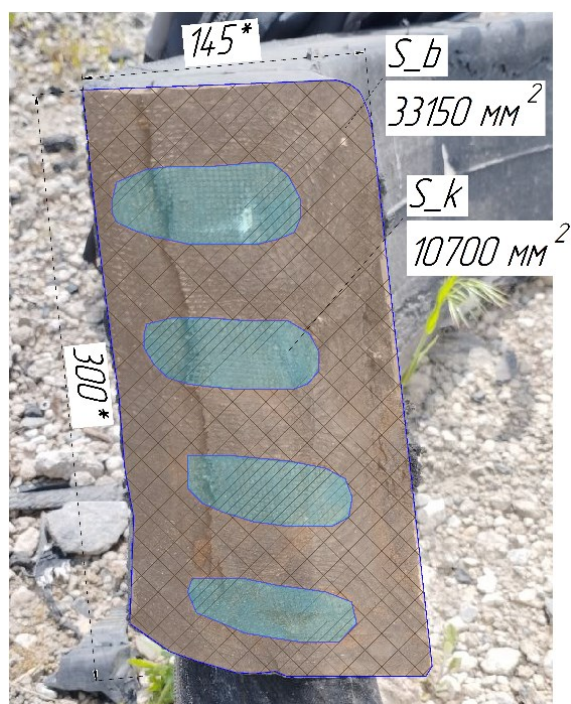


Рис. 7. Основание борта КГШ

Автомобильные шины с некоторым приближением могут быть отнесены к трёхслойным оболочкам, которые применяют в тех случаях, когда требуется повышенная жёсткость и минимизация массы. Высокая удельная изгибная жесткость в трёхслойных конструкциях достигается путём размещения на некотором расстоянии двух несущих слоёв, которыми в нашем случае являются слои резины. В качестве жесткого заполнителя каркаса в шинах используется металлический корд, что значительно усложняет задачу расчёта борта шины на изгиб. Совместное деформирование несущих слоёв при утилизации шины обеспечивается надёжным сцеплением резиновых

слоёв и корда при изготовлении шин. Особенности расчёта трёхслойного борта шины в основном связаны с учётом деформаций поперечного сдвига слоёв резины и изгибы металлического корда.

Для выполнения расчёта разрушения трёхслойного борта шины необходимо рассмотреть кинематическую модель деформирования трёхслойных оболочек вращения (рис. 8). Для построения модели воспользуемся кинематическим подходом, в основе которого лежат гипотезы о распределении перемещений по толщинам слоёв оболочки.

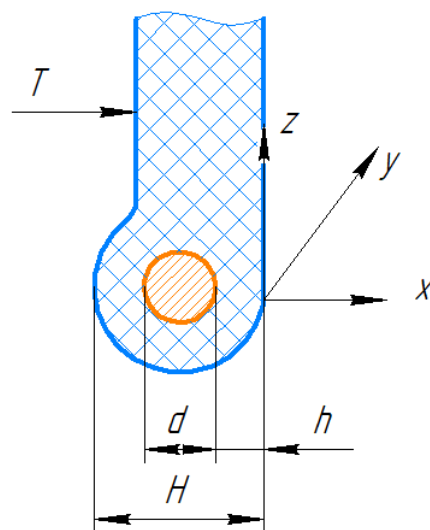


Рис. 8. Кинематическая модель деформирования трёхслойной оболочки вращения:

T – усилие необходимое для вырывания металлического кольца; d – диаметр бортового металлического кольца; h – длина резиновой прослойки с одной стороны борта;

H – ширина борта шины

Это позволит достаточно простым способом приближённо свести трехмерную задачу теории упругости к двумерной. Для оболочек величина измерения по координате Z гораздо меньше двух других измерений [16].

Основываясь на этом предложении перемещение вдоль координатных осей, можно искать в виде степенных рядов относительно аргумента Z_i (3–5):

$$V_1(x, y, z) = \sum_k^m a_k(x, y)z^k; \quad (3)$$

$$V_2(x, y, z) = \sum_k^m b_k(x, y)z^k; \quad (4)$$

$$V_3(x, y, z) = \sum_k^n c_k(x, y)z^k; \quad (5)$$

где V_1, V_2, V_3 – перемещение вдоль координатных осей; $m+1, n+1$ – числа удерживаемых разложений; a_k, b_k, c_k – коэффициенты разложения, представляющие функции аргументов x, y, z .

Для расчёта критических нагрузок сформулируем следующее допущение. Усилие будем рассматривать в виде суммарных величин T_x и T_y . В этом случае усилие будут распределяться по слоям пропорционально жесткости несущих слоёв.

Для описания деформирования многослойной оболочки – борта шины, использованы гипотезы Кирхгофа-Лява [16].

Поскольку суммарные усилия, требуемые для разрушения резинового слоя, значительно превышают технологическую силу, затрачиваемую на изгиб стального бортового кольца в процессе его извлечения, то последним можно пренебречь.

Выводы. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволили определить необходимое усилие для извлечения бортового кольца из крупногабаритных шин, которое составляет около 400–500 кН. Традиционные установки, использующие для развития усилия гидроцилиндры, имеют в этом случае ряд ограничений, связанных с большими габаритами гидроцилиндра и меньшим запасом его хода. Предложенная авторами конструкция установки позволяет значительно уменьшить занимаемые технологические площади и снизить себестоимость изготовления оборудования для извлечения бортовых колец.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлина Ж.В., Марьев В.А., Шувалов Ю.А. Переработка использованных шин: международный опыт // Твёрдые бытовые отходы. 2012. № 12(78). С. 58–63.
2. Goryunov S, Khoreshok A., Grigoryeva N., Preis E., Alitkina O. The research of operational temperatures of dump trucks tires // E3S Web of Conferences. The conference proceedings Sustainable Development of Eurasian Mining Regions: electronic edition. 2019.
3. Сиваков В.В., Гульцев Е.С. Эколого-экономические проблемы утилизации отработанных автомобильных шин // Экономика и эффективность организации производства. 2015. № 22. С. 90–93.
4. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the organization of maintenance and repair of dumpcars // Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. № 1. Pp. 33–38
5. Лозовая С.Ю., Кравченко В.М., Лозовой Н.М., Топчий Я.П. Анализ основных технологических схем и линий по переработке и утилизации резинотехнических изделий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. 2021. С. 104–109.
6. Федосеев И.В., Баркан М.Ш., Прохоцкий Ю.М., Ласкина Н.Е., Логинова А.Ю. Технология утилизации отработанных резинотехнических изделий // Экологические системы и приборы. 2013. № 8. С. 32–39.
7. Пат. 107491, Российская Федерация, МПК В02С 18/00, В26D 1/00. Установка для резки крупногабаритной и сверхкрупногабаритной шины / Е.Д. Филиппов : № 2011114050/13 : заявл. 11.04.2011 : опубл. 20.08.2011
8. Пат. 213116, Российская Федерация, МПК В26D 1/01. Ножницы гидравлические для резки шин/ М. В. Швецов, В. Ф. Ситников, А. В. Егошин; заявитель ПАО "Татнефть" имени В.Д. Шашина.: № 2022111677 : заявл. 28.04.2022 : опубл. 25.08.2022
9. Кострова З.А., Михеев А.В., Бушуева М.Е., Беляков В.В., Митяков С.Н. Утилизация пневматических и безвоздушных шин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 3(114). С. 120–130.
10. Grinchuk P.S., Fisenko, S.P. Heat Exchange with Air and Temperature Profile of a Moving Oversize Tire // J Eng Phys Thermophy 2016. №89. Pp. 1369–1373.
11. Лозовая С.Ю., Кравченко В.М., Лозовой Н.М., Топчий Я.П. Возможные направления использования продуктов переработки механическим способом резинотехнических изделий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. 2021. С. 110–113.
12. Bochkaryov Y., Ishkov A. The operational reliability of quarry dump trucks belaz-7540 in the

placer deposits // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332.

13. Пат. 201698, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова, К.В. Чуев, Ю.А. Чуева; заявитель ФГБОУ ВО «БГТУ им. Шухова» № 2020133204 : заявл. 08.10.2020 : опубл. 28.12.2020

14. Лучин И.В., Кравченко И.М., Конкин М.Ю. Методика расчёта процесса разрушения изношенных автомобильных шин и резино-технических изделий при утилизации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №8.4. С. 11–15.

15. Чуев К.В., Дуюн Т.А., Чуева Ю.А. Имитационное моделирование динамических характеристик промышленного робота с использованием программного комплекса MSC Adams // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского: Сборник докладов, Москва, 14 февраля 2020 года. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. С. 19–23.

16. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. 312 с.

Информация об авторах

Дуганов Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технология машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чуев Кирилл Витальевич, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Архипова Надежда Алексеевна, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: naarhipova53@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кравченко Владимир Михайлович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: livenec.vova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чуева Юлия Александровна, аспирант кафедры философии и теологии. E-mail: yulya.varavina.97@mail.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила 02.03.2022 г.

© Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н.А., Кравченко В.М., Чуева Ю.А., 2023

¹Duganov V.Ya., ¹Duyun T.A., ^{1,*}Chuev K.V., ¹Arhipova N.A., ¹Kravchenko V.M., ²Chueva Yu.A.

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

²Belgorod State National Research University

*E-mail: kirill.chuev@gmail.com

PROBLEMS OF RECYCLING LARGE-SIZED CAR TIRES

Abstract. The present article describes the problem of disposing of worn-out tires, which arises during the operation of heavy-duty dump trucks in the mining and construction industries. Worn-out tires cannot be buried in landfills and must be disposed of in accordance with Russian legislation. However, at present, equipment for processing large-sized tires has a high cost and occupies a large area. These problems can be solved by the "Installation for Removing the Cable from the Side Part of the Tire during Utilization", which has the same technical and operational characteristics and smaller dimensions compared to analogues. This installation is an effective and economically advantageous solution to the problem of disposing of worn-out tires in the mining and construction industries. Its use will reduce the negative impact on the environment and save resources. To determine the main technological parameters of the installation, an industrial experiment was

conducted on the "Hydraulic Puller of Rim Rings" equipment and smaller-sized tires, and a direct-proportional dependence was identified between the tire size and the force required to remove the rim ring.

Keywords: recycling of rubber products, tire recycling, large-size tires.

REFERENCES

1. Perlina Z.V., Marev V.A., Shuvalov Y.A. Recycling of used tires: international experience [Pererabotka ispol'zovannyh shin: mezhdunarodnyy opyt]. Tverdye bytovye othody. 2012. No. 12(78). Pp. 58–63 (rus)
2. Goryunov S., Khoreshok A., Grigoryeva N., Preis E., Alitkina O. The research of operational temperatures of dump trucks tires. E3S Web of Conferences. The conference proceedings Sustainable Development of Eurasian Mining Regions: electronic edition. 2019.
3. Sivakov V.V., Gultsev E.S. Environmental and economic problems of disposal of waste tires [Ekologo-ekonomicheskie problemy utilizatsii otrabotannyh avtomobil'nyh shin]. Ekonomika i effektivnost' organizatsii proizvodstva. 2015. No. 22. Pp. 90–93. (rus)
4. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the organization of maintenance and repair of dump-cars No. Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. № 1. Pp. 33–38
5. Lozovaya S.Y., Kravchenko V.M., Lozvoj N.M., Topchij A.P. Analysis of the main technological schemes and lines for processing and recycling of rubber products [Analiz osnovnyh tekhnologicheskikh skhem i linij po pererabotke i utilizatsii rezi-notekhnicheskikh izdelij]. Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nyh materialov. Mezhvuzovskiy sbornik statej. Belgorod, 2021. Pp. 104–109. (rus)
6. Fedoseev I.V., Barkan M.S., Prohockij Y.M., Laskina N.E., Loginova A.Y. Technology of recycling of used rubber products [Tekhnologiya utilizatsii otrabotannyh rezi-notekhnicheskikh izdelij]. Ekologicheskie sistemy i pribory. 2013. No. 8. Pp. 32–39. (rus)
7. Filippov E.D. Installation for cutting large and extra-large tires. Patent RF, no 2011114050/13, 2011
8. Shvecov M.V., Sitnikov V.F., Egoshin A.V. Hydraulic shears for tire cutting. Patent RF, no 2022111677, 2022.
9. Kostrova Z.A., Miheev A.V., Bushueva M.E., Belyakov V.V., Mityakov S.N. Utilization of pneumatic and airless tires [Utilizatsiya pnevmaticheskikh i bezvozdushnyh shin]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. 2016. No. 3(114). Pp. 120–130. (rus)
10. Grinchuk P.S., Fisenko, S.P. Heat Exchange with Air and Temperature Profile of a Moving Oversize Tire. J Eng Phys Thermophy. 2016. No. 89. Pp. 1369–1373.
11. Lozovaya S.Y., Kravchenko V.M., Lozvoj N.M., Topchij Y.P. Possible directions for the use of processed products by mechanical means of rubber products [Vozmozhnye napravleniya ispol'zovaniya produktov pererabotki mekhanicheskimi sposobami rezi-notekhnicheskikh izdelij]. Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nyh materialov. Mezhvuzovskiy sbornik statej. Belgorod, 2021. Pp. 110–113. (rus)
12. Bochkaryov Y., Ishkov A. The operational reliability of quarry dump trucks belaz-7540 in the placer deposits. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332.
13. Duganov V.Y., Arhipova N.A., Chuev K.V., Chueva Y.A. Installation for removing the cable from the side of the tire during disposal. Patent RF, no 2020133204, 2020 (rus)
14. Luchin I.V., Kravchenko I.M., Konkin M.Y. Methodology for calculating the process of destruction of worn-out car tires and rubber products during recycling. [Metodika raschyota processa razrusheniya iznoshennyh avtomobil'nyh shin i rezino-tekhnicheskikh izdelij pri utilizatsii]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy. 2014. No. 8. 4. Pp. 11–15. (rus)
15. Chuev K.V., Duyun T.A., Chueva Y.A. Simulation of dynamic characteristics of an industrial robot using the MSC Adams software package. [Imitacionnoe modelirovanie dinamicheskikh harakteristik promyshlennogo robota s ispol'zovaniem programmnoy kompleksa MSC Adams]. Vserossiyskaya nauchno-metodicheskaya konferenciya, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.P. Malevskogo: Sbornik dokladov, Moskva, 14 fevralya 2020y. Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana (nacional'nyy issledovatel'skiy universitet), 2020. Pp. 19–23. (rus)
16. Alfutov N.A. Fundamentals of stability calculations for elastic systems [Osnovy rascheta na ustojchivost' uprugih sistem]. M.: Mashinostroenie. 1978. 312 p. (rus)

Information about the authors

Duganov, Vladimir Y. PhD, Assistant professor. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. DSc, Professor. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chuev, Kirill V. Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Arhipova, Nadezhda A. Assistant professor. E-mail: naarhipova53@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kravchenko, Vladimir M. Postgraduate student. E-mail: livenec.vova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chueva, Yuliya A. Postgraduate student. E-mail: yulya.varavina.97@mail.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, St. Pobedy, 85.

Received 02.03.2022

Для цитирования:

Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н.А., Кравченко В.М., Чуева Ю.А. Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112

For citation:

Duganov V.Ya., Duyun T.A., Chuev K.V., Arhipova N.A., Kravchenko V.M., Chueva Yu.A. Problems of recycling large-sized car tires. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112