

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

10

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**

№ 10, 2023 год

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

Vol. 10. 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	16.10.2023
Выход в свет	23.10.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,89. Уч.-изд. л. 13,86. Тираж 40 экз. Заказ № 129

© 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:	16.10.2023

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 государственного университета имени В.И. Вернадского (РФ, г. Симферополь).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

Семенцов 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).

Тиратурян 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).

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

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

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

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

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

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. Strokovaya, 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

Неровная С.В., Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Огурцова Ю.Н., Губарева Е.Н., Клименкова Е.В.

КИСЛОТНО-ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ МИКРОАРМИРУЮЩИХ
ФИБР КАК КОМПОНЕНТА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА ДЛЯ ШТУКАТУРНЫХ СМЕСЕЙ

8

Ряжских Б.Е.

ИСПЫТАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ ОБЪЕМНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО
БЛОКА 17-ЭТАЖНОГО ОБЪЕМНО-БЛОЧНОГО ЗДАНИЯ (ОБД)

20

Юрьев А.Г., Панченко Л.А.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ НАЧАЛО В ТЕОРИИ СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИЙ

35

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО
ТЕПЛООБМЕННИКА КОНДЕНСАТОРА ПРОМЫШЛЕННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ
МАШИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

42

Березкин С.А

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ АСТРАХАНИ В ПОСЛЕДНЕЙ
ЧЕТВЕРТИ XVIII ВЕКА

57

Супранович В.М.

ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ
ОБЪЕКТОВ МУСОРОСОРТИРОВКИ И МУСОРОПЕРЕРАБОТКИ В РОССИИ

68

Славина Т.А.

ПРОЕКТНЫЙ ЧЕРТЕЖ – РЕВОЛЮЦИЯ В РУССКОЙ АРХИТЕКТУРЕ

78

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Коновалов В.М., Гостев Н.С., Федоров А.С.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

85

Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ
ТИПОВ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ МАТРИЧНЫХ (ВЯЖУЩИХ) СИСТЕМ

93

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Искачёв С.А., Совков А.Н., Яркин А.Л., Подоляк О.О., Овчинникова В.А., Лавринов Д.С.

ВЫБОР МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

102

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Nerovnaya S.V., Sivalneva M.N., Strokov V.V., Ogurtsova Yu.N., Gubareva E.N., Klimenkova E.V.**
ACID-BASE PROPERTIES OF THE SURFACE OF MICRO-REINFORCING FIBERS AS A COMPONENT OF A PHOTOCATALYTIC COMPOSITE MATERIAL FOR PLASTER MIXES 8
- Riazhskikh B.E.**
STATIC LOAD TESTING OF A VOLUMETRIC PRECAST REINFORCED CONCRETE MODULE OF A 17-STORY RESIDENTIAL MODULAR BUILDING 20
- Yuriev A.G., Panchenko L.A.**
ENERGY BEGINNING IN THE THEORY OF STRUCTURE SYNTHESIS 35
- Savvin N.Y., Garbuzov D.D.**
INVESTIGATION OF THE COOLING EFFICIENCY OF THE PLATE HEAT EXCHANGER OF THE CONDENSER OF AN INDUSTRIAL REFRIGERATION MACHINE AT DIFFERENT FAN SPEEDS 42
- Berezkin S.A.**
URBAN PLANNING DEVELOPMENT OF ASTRAKHAN IN THE LAST QUARTER OF THE XVIII CENTURY 57
- Supranovich V.M.**
FEATURES OF URBAN PLANNING LOCATION OF EXISTING OBJECTS OF WASTE SORTING AND WASTE PROCESSING IN RUSSIA 68
- Slavina T.A.**
DESIGN DRAWING – A REVOLUTION IN RUSSIAN ARCHITECTURE 78

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Konovalov V.M., Gostev N.S., Fedorov A.S.**
MATERIAL AND THERMAL BALANCE OF THE SHAFT FURNACE FOR LIME PRODUCTION USING CHEMICAL HEAT RECOVERY 85
- Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kurbatov A.P., Lisnyak V.V.**
INVESTIGATION OF THE MATERIAL COMPOSITION AND STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TWO TYPES OF HIGH-ALUMINA MATRIX (BINDER) SYSTEMS 93

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Iskachev S.A., Sovkov A.N., Yarkin A.L., Podolyak O.O., Ovchinnikova V.A., Lavrinov D.S.**
SELECTION OF A METHOD FOR CONTROLLING THE GEOMETRIC DIMENSIONS OF PARTS IN GEODETIC PRODUCTION 102

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-8-19

***Неровная С.В., Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Огурцова Ю.Н.,
Губарева Е.Н., Клименкова Е.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nerovnaya.sofya@yandex.ru

КИСЛОТНО-ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ МИКРОАРМИРУЮЩИХ ФИБР КАК КОМПОНЕНТА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ШТУКАТУРНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. В работе проведен анализ фибр различного вида с точки зрения их потенциального использования в качестве компонента фотокаталитического композиционного материала (ФКМ) состава «фибра – анатаз», который предназначен для применения в качестве добавки с целью создания штукатурных покрытий, обладающих эффектом самоочищения. С целью моделирования условий золь-гель осаждения TiO_2 на носитель и синтеза анатаза рассматриваемые виды фибры были подвергнуты термическому воздействию при 550 °С, а также химической обработке различными кислотами (азотной, уксусной, муравьиной). Большинство химических и физических процессов, протекающих с участием поверхности твердых веществ, носят локальный характер и во многом определяются энергетическими параметрами конкретных активных центров. В связи с этим критерием оценки изменения свойств поверхности различных фибр как носителя фотокатализатора являлся характер распределения центров адсорбции в области кислот Бренстеда и установление их количественной концентрации, определяемые с помощью индикаторного метода. Определено положительное влияние на активность поверхности фибр воздействий, способствующих моделированию процесса золь-гель синтеза ФКМ. Установлен характер изменения суммарного количества центров адсорбции в зависимости от типа воздействия и вида фибры.

Ключевые слова: штукатурные смеси, самоочищение, фибра, фотокаталитические материалы, кислотно-основные свойства.

Введение. Возникновение экологических проблем современных городов напрямую связано с устойчивым развитием и высоким уровнем урбанизации. Ее интенсивные процессы зачастую сопровождаются увеличением нагрузки на окружающую среду за счет образования большого количества производственных и бытовых отходов, выбросов от автотранспорта, способствующих снижению возможности самовосстановления природной среды. Так, например, увеличение концентрации летучих органических веществ, аммиака, оксидов азота и серы, других соединений в атмосферном воздухе с последующим их осаждением на фасадах зданий и сооружений влияет на загрязнение окружающей среды и эстетическую составляющую городского пространства. Негативное воздействие выражается снижением долговечности стеновых конструкций и архитектурной выразительности фасадов, вызванной не только загрязнением, но и изменением исходного цвета декоративного материала. В этой связи определяется необходимость обеспечения безопасного развития урбоэкосистемы [1] путем создания отделочных материалов, обладающих рядом преимуществ: стойкостью к трещинообразованию, вызванному усадкой сте-

новых конструкций, высокой прочностью и адгезией к основанию, а также способностью к самоочищению.

Рынок строительной индустрии наполнен широким спектром различных видов отделочных материалов, отличающихся назначением, свойствами, дизайнерскими решениями. Разработка и применение самоочищающихся штукатурных смесей является одним из перспективных направлений в области фасадных покрытий [2–5]. Эффект самоочищения в данных системах реализуется использованием фотокаталитических агентов, что способствует: уменьшению концентраций загрязняющих веществ на фасадах за счет их разложения до простых соединений в результате протекания окислительно-восстановительных реакций под действием ультрафиолетового излучения [6–9]; проявлению свойств супергидрофильной поверхности и более эффективного смывания загрязнителей водой [10, 11]. В совокупности это приводит к сохранению исходной чистоты и цвета покрытий в условиях воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды на протяжении более длительного времени [6, 12, 13]. Независимо от функционального разнообразия штукатурных смесей одним из требований, предъявляемых к готовым покрытиям, является обеспечение необходимых показателей

прочности и адгезии к конструктивным элементам зданий, стойкости к трещинообразованию [14].

Высокая значимость конструктивных характеристик в данном случае определяется разработкой тонкослойных штукатурных покрытий, обеспечивающих комплексную защиту конструкций от внешних факторов. Их эффективность заключается в увеличении срока службы фасада за счет повышенной долговечности и сохранении стоимости, которая достигается сниженным расходом сырьевой смеси.

Решением вышеуказанной комплексной проблемы является снижение последствий нарушения городской экосферы путем использования фотокаталитических материалов для придания самоочищающейся способности тонкослойным штукатурным покрытиям.

Применение добавки фотокаталитического материала в чистом виде в составе бетонной смеси связано с рядом технологических трудностей, влиянием на процессы гидратации, а также низкой эффективностью при эксплуатации. Малые дозировки высокодисперсного диоксида титана анатазной модификации (эффективность достигается при использовании фотокатализатора в количестве до 1 %) весьма сложно равномерно распределить в объеме смеси, в виду чего формируются лишь локальные зоны фотокаталитической активности на поверхности строительного материала. Увеличение дозировки анатаза приводит к его перерасходу и, как следствие, к повышению водопотребности (в виду высокой дисперсности добавки), загущению смеси, замедлению сроков схватывания, влиянию на протекание процессов гидратации. Нарушение процессов гидратации приводит к ухудшению физико-механических свойств цементного камня и бетона в целом. Помимо этого, в виду отсутствия химического взаимодействия анатаза с компонентами цементной матрицы, при эксплуатации происходит выветривание фотокаталитического агента из поверхностных слоев цементобетонной матрицы, снижая самоочищающую способность строительного материала. Решением вышеуказанных проблем является применение фотокаталитических композиционных материалов.

В ранее выполненных работах [13, 15–17] была изучена возможность получения фотокаталитических композиционных материалов (ФКМ), где в качестве подложки при золь-гель осаждении диоксида титана использовались природные (осадочные органогенные (диатомит), хемогенные (опока, трепел) породы) и техногенные пуццоланы (пирогенный отход – микрокремнезем). Доказана эффективность их использова-

ния в составе строительных композитов на цементной основе, обусловленная совмещением пуццоланового и фотокаталитического эффектов.

Особое внимание при разработке ФКМ уделяется выбору и оценке эффективности сырьевых компонентов, используемых в качестве носителя (подложки) фотокаталитического агента. В работах [17–21] сформулированы определённые требования к исходным материалам, используемым в качестве подложки фотокаталитического агента в цементных системах: высокие показатели степени аморфизованности материала (не менее 70 %), однородный гранулометрический состав со стремлением к монодисперсному распределению частиц по размерам, высокоразвитая химически активная поверхность (наличие микро- и нанопор, преимущественное содержание кислотных центров по Бренстеду) и др. Также стоит отметить, что эффективность фотокатализа находится в прямой зависимости от площади взаимодействия ультрафиолетового излучения с поверхностью фотокаталитического агента.

Специфика нанесения штукатурных смесей и их дальнейшая эксплуатация ставит задачи по разработке составов, обеспечивающих формирование покрытия с требуемой прочностью на изгиб и заданной адгезией поверхностного слоя к защищаемой конструкции. Это означает, что для создания эффективных штукатурных смесей помимо пуццоланового компонента необходимо наличие микроармирующего компонента, повышающего как предел прочности при изгибе, так и трещиностойкость цементной матрицы.

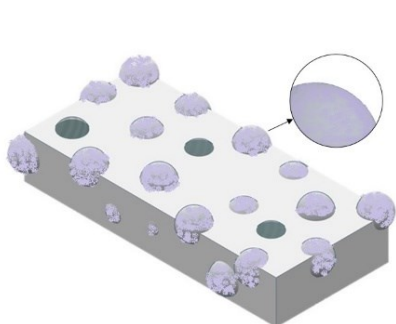
Решением обозначенных проблем при формировании самоочищающегося штукатурного покрытия для строительных объектов может стать разработка фотокаталитического композиционного материала с использованием не дискретного, а протяженного (волокнутого) наполнителя. Замена дискретного носителя на волокнистый обеспечит численный рост центров взаимодействия фотокатализатора с ультрафиолетовым излучением за счет протяженной формы подложки и увеличения адгезии к матричной структуре композита (рис. 1). Такой вид ФКМ позволит создать иерархически развитую поверхность покрытия [22]. Таким образом, произойдет совмещение фотокаталитического эффекта и эффекта лотоса, что усилит способность самоочищения поверхности.

В связи с этим возникает необходимость в разработке фотокаталитического композиционного материала состава «фибра – анатаз», применение которого в штукатурной смеси позволит увеличить фотокаталитическую активность за

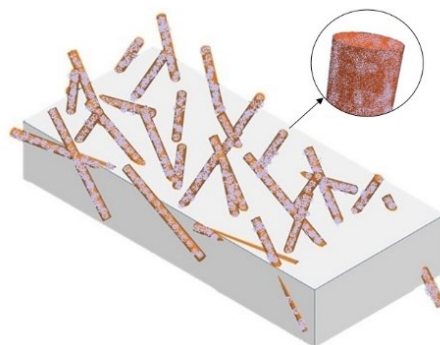
счет более равномерного распределения фотокаталитического агента в объеме смеси, повышения активной поверхности TiO_2 , при сохранении микроармирующей функции волокна.

Данная работа направлена на определение кислотно-основных свойств различных волокон

в исходном состоянии и подвергшихся обработке согласно ранее установленным параметрам синтеза TiO_2 с целью дальнейшего подбора оптимально эффективного типа фибры.



а



б

Рис. 1. Схема поверхности покрытия в зависимости от вида используемого наполнителя – носителя фотокаталитического агента: а – дискретный; б – волокнистый

Материалы и методы. В ранее выполненных работах [15-17, 23] была представлена технология получения фотокаталитического композиционного материала. Ее суть заключается в золь-гель синтезе диоксида титана анатазной модификации на подложке, в качестве которой выступали кремнеземные породы. Процесс структурообразования пленок диоксида титана зависит от реологических показателей реакционной смеси, содержащей титановый прекурсор, растворитель, стабилизатор. В качестве катализатора гидролиза и для стабилизации золя использовали азотную кислоту. Также технологический процесс предполагает высокотемпературную обработку (до температуры $550\text{ }^{\circ}\text{C}$) [23]. В связи с чем планируется, что данные условия синтеза будут приняты за основу для разработки ФКМ состава «фибра – анатаз».

Характеристики сырьевых материалов. Изучение кислотно-основных свойств поверхности волокон, рассматриваемых как подложки фотокаталитического композиционного материала, проводился для следующих материалов: базальтовая фибра (БФ) производства ООО «Каменный век» (Московская область, г. Дубна), стеклянная фибра (СФ) производства ООО «НЗК» (г. Нижний Новгород), стеклянная щелочестойкая фибра (СЩФ) «ARM STRUCTURE» производства ООО НПО «Структура» (г. Краснодар). Для адекватности результатов сравнительной оценки выбор видов фибр осуществлялся по схожести их геометрических значений, физико-механических свойств и значений температуры плавления, превышающей температуру обжига в технологии получения ФКМ (табл. 1). Следует отметить, что в виду низкой температуры плавления, фибры органического состава не рассматривались.

Таблица 1

Основные характеристики фибр

Показатель	Вид фибры		
	базальтовая	стеклянная	стеклянная щелочестойкая
Прочность на растяжение, МПа	2700–3200	1800–3000	1800–3000
Диаметр волокна, мкм	10–22	13–15	13–15
Длина волокна, мм	12	12	12
Модуль упругости, ГПа	85–95	70–74	70–74
Удлинение при разрыве, %	3,2	2,4	2,4
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1450	860	860
Стойкость к щелочам и коррозии	Высокая	Низкая	Высокая
Плотность, г/см^3	2,60	2,60	2,60

Для моделирования условий синтеза ФКМ использовались следующие кислоты: азотная «ХЧ» ГОСТ 4461–77, уксусная «ХЧ» ГОСТ 61–75 и муравьиная 85 % ГОСТ 5848–73 производства АО «База № 1 Химреактивов», рабочая концентрация которых была доведена до 65 %. Следует отметить, что при дальнейшей реализации технологии осаждения TiO_2 на носитель в качестве прекурсора для получения золя TiO_2 используется тетрабутоксититан (ТБТ), который растворяют 95 %-ным раствором этилового спирта, куда предварительно вводится кислота [23]. В дальнейшем при практической реализации технологии получения ФКМ требуется корректировка состава реакционной смеси с целью выбора наиболее эффективного для системы «фибра – анатаз».

Подготовка образцов. Изучение кислотно-основных свойств поверхности фибры осуществлялось с учетом технологических параметров синтеза ФКМ, моделирующих влияние на фибру. Подготовка образцов всех видов волокон представляла собой:

- термическое воздействие при 550 °С в течение 2 часов;
- выдержку в растворах различных кислот в течение 2 часов с последующей промывкой и сушкой.

Исследованию подвергались подготовленные образцы исходных и обработанных фибр.

Для обоснования выбора и оценки фибры как носителя фотокаталитического агента проведены исследования кислотно-основных свойств поверхности фибр, определяющих ее активность. Установление количественной концентрации и распределение кислотно-основных центров на поверхности волокнистых материалов проводили с помощью индикаторного метода распределения центров адсорбции (метод РЦА), позволяющего оценить их сорбционные свойства [24]. Суть метода заключается в том, что различные кислотные и основные центры на поверхности твердого тела избирательно адсорбируют молекулы индикаторов. Изучение кислотно-основных свойств поверхности твердого вещества подразумевает определение концентрации активных центров (q_{pKa}), эквивалентной количеству адсорбированного индикатора кислотной силы (pKa). Методика активно применяется в исследованиях и представлена в работах [16, 25, 26]. Анализируя полученные значения содержания центров адсорбции, можно спрогнозировать механизм протекания физико-химических процессов на поверхности твердого тела.

Описание кислотно-основных свойств поверхности основано на теории Бренстеда-Лоури

и Льюиса. Реальная поверхность твердого тела представляется как «набор» поверхностных центров двух типов:

- Льюиса (апротонные центры), представляющих собой электронодонорные ионы кислотного рода или неметаллов и электроноакцепторные орбитали катионов металлов;
- Бренстеда (протонные центры), представляющих собой гидроксильно-гидратный покров, образующийся в результате адсорбции молекул воды и её фрагментов на апротонных центрах.

Распределение центров адсорбции по шкале pKa осуществляется следующим образом: диапазон значений менее 0 соответствует основаниям по Льюису, 0...+7 – кислотам по Бренстеду, +7...+14 – основаниям по Бренстеду, более 14 – кислотам по Льюису [27].

Основная часть. Химическая и энергетическая неоднородность поверхности твердых тел определяется наличием на поверхности структурных дефектов и функциональных групп различного состава, проявляющих себя в качестве активных центров при адсорбции и химических реакциях. Одной из характеристик, которая отражает реакционную способность поверхности в донорно-акцепторных взаимодействиях, является совокупность кислотно-основных свойств вещества. В связи с чем данное исследование направлено на выбор оптимального типа фибры или ее ранжирование с позиции взаимодействия поверхностных активных центров с титансодержащим катализатором.

Следует отметить, что непосредственно для данных материалов анализ кислотно-основных свойств целесообразно производить избирательно в области кислотных центров Бренстеда, определяющих рост активности фотокаталитических реакций в составе комплексной добавки, и процессов, происходящих при структурообразовании цементных систем разрабатываемых штукатурных покрытий [15]. При этом следует оценить возможное изменение активности поверхности исходных волокон в результате процессов термической и химической обработки образцов.

Алюмосиликатный состав фибр (табл. 2) обуславливает гидроксильность их поверхности, в результате чего поверхностные группы –ОН вносят свой вклад в показатель кислотности по Бренстеду, они способны отдавать протон, превращая адсорбированное основание в сопряженную ему форму кислоты [15].

По химическому составу все виды фибр являются алюмосиликатными (табл. 2 по данным элементного анализа).

Таблица 2

Химический состав фибр

Вид фибры	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	прочее
БФ	50,78	20,86	8,49	9,5	1,58	4,35	2,64	1,17	0,63
СФ	53,94	18,13	25,11	0,27	0,39	1,05	0,17	0,14	0,80
СЩФ	54,64	18,42	24,71	0,27	0,41	0,81	0,16	0,19	0,39

Для визуализации характера распределения центров адсорбции на поверхности образцов в области кислот Бренстеда ($pK_a=0-7$) результаты представлены отдельно для различных типов фибр (рис. 2). При этом результаты по константе диссоциации $pK_a=0,8$ не представлены в виду малых числовых значений.

Анализ результатов распределения активных центров адсорбции на поверхности базальтовой фибры (рис. 2, а) в области кислот Бренстеда показал максимальное их преобладание для индикаторов с $pK_a=2,5$. Влияние термической обработки базальтовой фибры сводится к значительному росту концентраций активных центров и составляет около 80 % в сравнении с контрольным образцом. Второй способ моделирования условий синтеза – выдержка в кислотах, не имеет такого выраженного влияния. Наблюдается увеличение концентрации активных центров в сравнении с исходным образцом на 50 % в случае использования азотной кислоты. Выстраивание кислот по эффективности влияния на процесс фотокатализа также требует рассмотрения суммарного количества активных центров на поверхности волокна (табл. 3).

Аналогичная картина прослеживается для образцов стеклянной фибры, поверхность которой определена активностью кислотных центров Бренстеда с преобладанием пиковых значений при $pK_a=2,5$ (рис. 2, б). Максимальным содержанием центров адсорбции отмечены образцы, термообработанные и выдержанные в муравьиной кислоте с концентрацией активных центров (q), равной 12,0 и 10,2 ммоль/г соответственно. Следует отметить неоднозначный характер распределения центров стекловолокон, выдержанных в уксусной кислоте, т.к. данный образец показывает либо наименьшие значения концентрации q (при $pK_a=1,3$; 2,5 и 3,46), либо максимальные (при $pK_a=2,1$; 5,0 и 6,4).

На поверхности стеклянной щелочестойкой фибры отмечается рост концентрации активных центров в области $pK_a=2,5$ для волокон, выдержанных в кислотах, особенно азотной и муравьиной (рис. 2, в). Наиболее низкую активность проявляет поверхность фибры, подвергшаяся температурному воздействию.

Для обобщения полученных данных представлено суммарное количество активных кислотных центров Бренстеда на поверхности различных волокон (табл. 3). Анализ концентраций

активных центров кислот Бренстеда на поверхности изучаемых фибр показал, что волокна в исходном состоянии не имеют значительных различий, лишь наблюдается некоторое преимущество стеклянной щелочестойкой фибры. При этом поскольку по химическому составу фибры отличаются незначительно (оксидов кремния, алюминия и кальция от 80 до 97 %), суммарное количество активных центров незначительно возрастает в последовательности БФ→СФ→СЩФ, что коррелирует с изменением степени развитости морфологии поверхности фибр (рис. 3). БФ наиболее гладкая, тогда как на СФ и СЩФ наблюдаются локальные наросты.

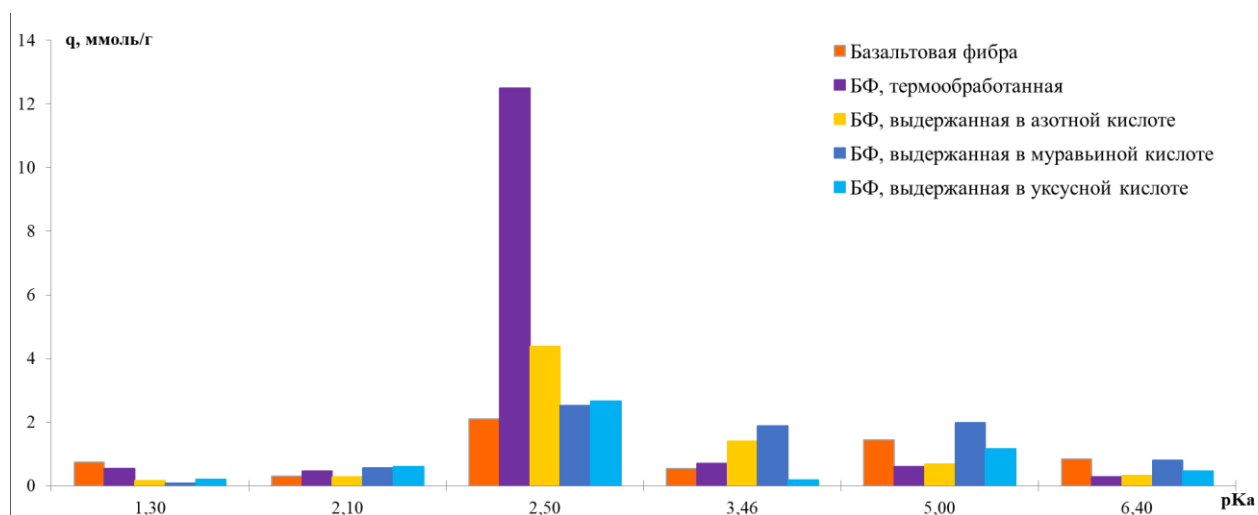
Прослеживается влияние предварительной обработки поверхности:

– СЩФ: температурное воздействие негативно сказывается на ее активности, снижая в 2 раза; химическая обработка, особенно при использовании азотной кислоты, увеличивает концентрацию центров до 42 % в сравнении с контрольным образцом;

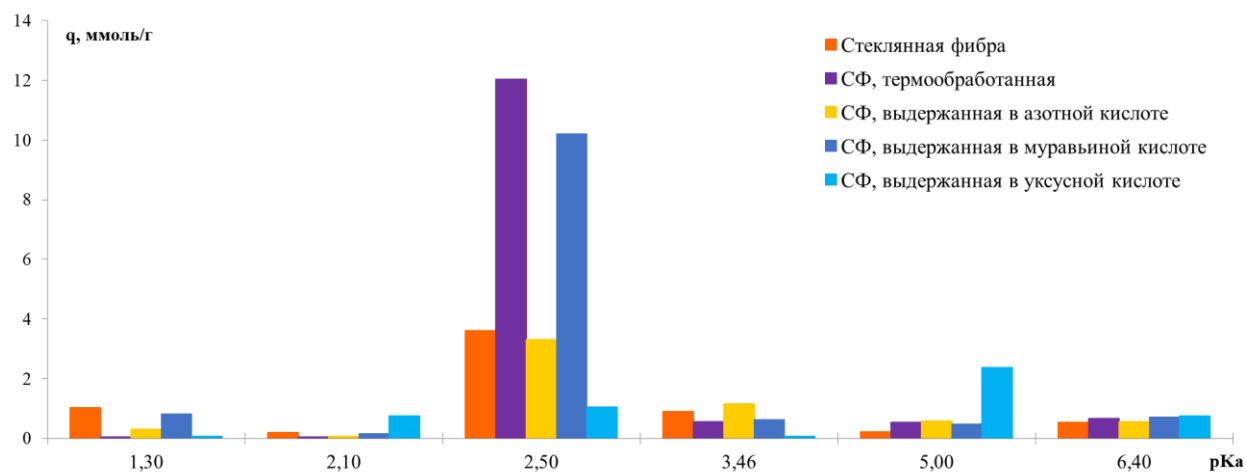
– СФ: увеличение активных центров на поверхности волокна показывают два образца – термообработанные волокна и выдержанные в муравьиной кислоте (рост в сравнении с исходными данными составляет около 50 %). Использование уксусной кислоты приводит к снижению первоначальных показателей;

– БФ: рост показателей концентрации Бренстедовских кислотных центров при термообработке до 60 %. При воздействии кислот рост наибольший отмечен для азотной и муравьиной.

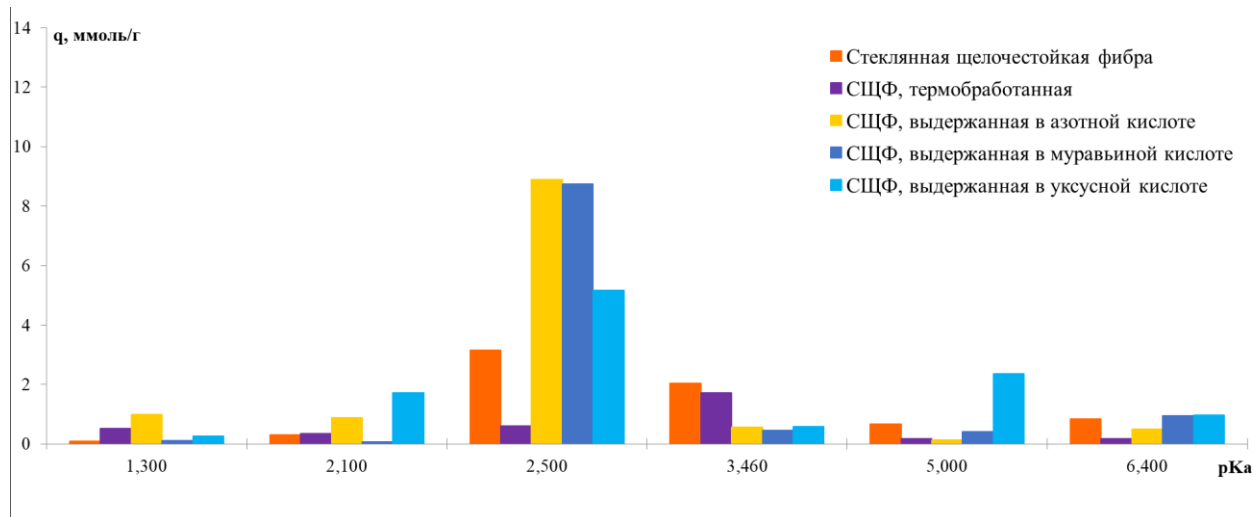
Рост активных центров фибры при дополнительном воздействии может быть вызван физико-химическими факторами, обусловленными протеканием процесса выделения химически связанной воды и формированием бренстедовских кислот, характеризующихся донорной способностью, а также наличием на поверхности волокон в исходном состоянии замасливающих составов, которые удаляются при высокой температуре или травлении. Таким образом, обработка фибры в рамках технологии синтеза ФКМ позволяет обнажить активные центры поверхности волокна для их взаимодействия с реакционной смесью золя диоксида титана и его закрепления, а также для увеличения эффективности ее сцепления с цементной матрицей.



а



б



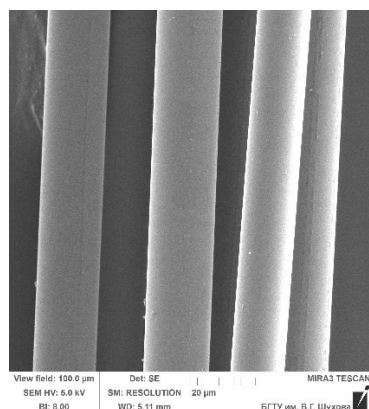
в

Рис. 2. Распределение центров адсорбции на поверхности фибр в области кислот Бренстеда:
а – базальтовой (БФ), б – стеклянной (СФ), в – стеклянной щелочестойкой (СЩФ)

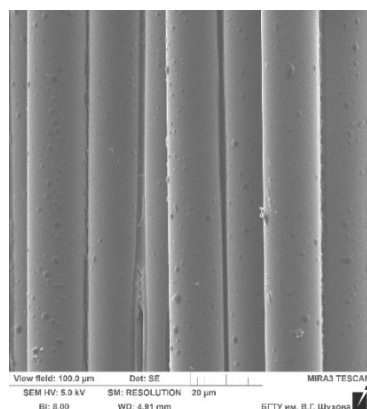
Таблица 3

Количество кислотных центров Бренстеда на поверхности различных фибр

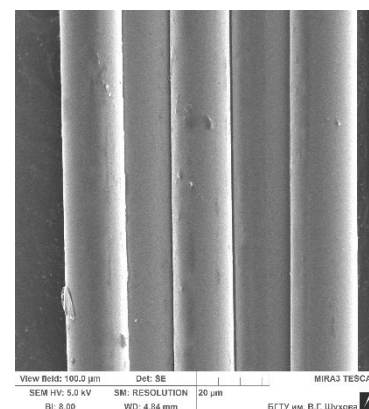
Количество активных центров (q), ммоль/г (в зависимости от обработки и вида фибры)				
Контроль (без обработки)	Термообработка	Выдержка в кислотах		
		азотная кислота	муравьиная кислота	уксусная кислота
Базальтовая фибра				
6,00	15,11	7,23	7,75	5,26
Стеклянная фибра				
6,54	13,90	5,99	13,02	5,09
Стеклянная щелочестойкая фибра				
7,11	3,55	12,19	11,05	11,27



а



б



в

Рис. 3. Поверхность исходных волокон фибр:

а – базальтовая, б – стеклянная, в – стеклянная щелочестойкая

Однако, изучение кислотно-основных свойств представленных волокон фибр с учетом их типа и способа обработки, моделирующего технологию получения ФКМ как полифункциональной добавки для декоративных штукатурных покрытий, не дает однозначности при выборе фибры как носителя фотокаталитически активного диоксида титана (анатаза). В связи с чем планируется широкий комплекс исследований микроармирующей фибры с учетом ее состава, морфоструктуры, свойств, физико-химического взаимодействия с компонентами золя и технологических параметров синтеза.

Выводы. Большинство химических и физических процессов, протекающих с участием поверхности твердых веществ, носят локальный характер и во многом определяются энергетическими параметрами конкретных активных центров. В связи с этим особую важность приобретает исследование спектра распределения центров адсорбции по кислотно-основному типу и характеру его изменения в зависимости от тех или иных условий.

Целенаправленно при оценке кислотно-основных свойств изучаемых объектов был выбран диапазон, отвечающий кислотным центрам Бренстеда, которые обуславливают рост фотокаталитической активности. Оценка одного пара-

метра, определяющего степень активности поверхности, является недостаточной для осуществления окончательного отбора или ранжирования фибры как компонента полифункциональной фотокаталитической добавки для штукатурных смесей. При этом определено положительное влияние условий дополнительного воздействия, моделирующих процесс золь-гель синтеза ФКМ, на активность поверхности проанализированных фибр. Установлен характер изменения суммарного количества центров адсорбции в зависимости от типа воздействия и вида фибры: предварительная температурная обработка поверхностей базальтовой и стеклянной фибр способствует увеличению концентрации активных центров до 50–60 %, при этом оказывает негативное влияние на активность стеклянных щелочестойких волокон. В свою очередь, химическая обработка способствует росту активности на поверхности щелочестойкой фибры, при обработке двух других видов фибр увеличения количества активных центров не происходит.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Майснер Т.Н. Урбанизация и экология городской среды: риски и перспективы устойчивого развития // Гуманитарий Юга России. 2020. Том 9. № 3. С. 190–201. DOI: 10.18522/2227-8656.2020.3.14.
2. George C., Beeldens A., Barmpas F., Doussin J., Manganelli G., Herrmann H., Kleffmann J., Mellouki A. Impact of photocatalytic remediation of pollutants on urban air quality // *Frontiers of Environmental Science*. 2016. Vol. 10. No 5. DOI: 10.1007/s11783-016-0834-1.
3. Yang L., Hakki A., Wang F., MacPhee D. Photocatalyst efficiencies in concrete technology: The effect of photocatalyst placement // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 222. Pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.10.013.
4. Amor F., Baudys M., Racova Z., Scheinherrová L., Ingrisova L., Hajek P. Contribution of TiO₂ and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. e00965. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00965.
5. Janczarek M., Klapiszewski Ł., Jędrzejczak P., Klapiszewska I., Slosarczyk A., Jesionowski T. Progress of functionalized TiO₂-based nanomaterials in the construction industry: A comprehensive review // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. No. 3. 132062. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132062.
6. Фаликман В.Р. Нанопокрывтия в современном строительстве // *Нанотехнологии в строительстве*. 2021. Т. 13. №1. С. 5–11. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-5-11.
7. Тюкавкина В.В., Цырятьева А.В. Структура цементного камня, модифицированного нанодисперсной титаносодержащей добавкой // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 597–601. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.122.
8. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Постникова О.А., Головин С.Н., Боровик Е.Г. Структура цементного камня с диспергированным диоксидом титана в суточном возрасте // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 13–17.
9. Хела Р., Боднарлова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа TiO₂ в бетоне // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 77–81. DOI: 10.31659/0585-430X-2015-722-2-77-81.
10. Рудакова А.В., Опаричева У.Г., Гришина А.Е., Катаева Г.В., Емелин А.В. Эффект супергидрофильности поверхности оксидов металлов // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10. С. 1959–1962.
11. Emeline A.V., Rudakova A.V., Sakai M., Murakami T., Fujishima A. Factors affecting UV-induced superhydrophilic conversion of TiO₂ surface // *The Journal of Physical Chemistry* 2013. Vol. 117. No. 23. Pp. 12086–12092. DOI: 10.1021/jp400421v.
12. Фаликман В.Р. Об использовании нанотехнологий и наноматериалов в строительстве. Часть 1 // *Нанотехнологии в строительстве*. 2009. Т. 1. № 1. С. 24–34.
13. Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы, свойства, применение // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 3. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25.
14. Белова Т.К. Штукатурные растворы с улучшенными эксплуатационными свойствами на основе модифицированных сухих строительных смесей // *Вестник евразийской науки*. 2019. Т. 11. № 3. С. 32.
15. Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 16–21. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21.
16. Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Лабузова М.В. Сравнительная оценка активности кремнеземного сырья и фотокаталитического композиционного материала на его основе // *Обогащение руд*. 2019. № 6. С. 25–30.
17. Строкова В.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н. Оценка свойств кремнеземного сырья как подложки в составе композиционного фотокаталитического материала // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 2. С. 6–12.
18. Балыков А.С., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Володин С.В. Оценка эффективности минеральных добавок в цементных системах при разработке фотокаталитических композиций «ядро – оболочка» // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14, № 5. С. 405–418. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-5-405-418.
19. Wang D., Hou P., Stephan D. Huang S., Zhang L., Yang P., Cheng X. SiO₂/TiO₂ composite powders deposited on cement-based materials: Rhodamine B removal and the bonding mechanism // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. 118124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118124.
20. Fatimah I., Prakoso N. I., Sahroni I., Miqdam Musawwa M., Sim Y., Kooli F., Muraza O. Physicochemical characteristics and photocatalytic performance of TiO₂/SiO₂ catalyst synthesized using biogenic silica from bamboo leaves // *Heliyon*. 2019. Vol. 5. No. 11. e02766. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02766.

21. Pal A., Jana T. K., Chatterjee K. Silica supported TiO₂ nanostructures for highly efficient photocatalytic application under visible light irradiation // Materials Research Bulletin. 2016. No. 76. Pp. 353–357. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.12.040.

22. Кожухова М.И., Кнотыко А.В., Соболев К.Г., Кожухова Н.И. Микроструктурные особенности формирования иерархической структуры на гидрофобизированной поверхности бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 6–9.

23. Antonenko M.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties of photocatalytic composite material // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 16–22.

24. Байдарашвили М.М., Сахарова А.С. Исследование сорбционных свойств материалов с помощью физико-химического метода распреде-

ления центров адсорбции // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 1. С. 87–94. DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2383.

25. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Гузеева О.Н. Кислотно-основные центры поверхности кварцевого песка в технологии электропроводящих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 58–63.

26. Цыганова Т.А., Антропова Т.В., Мякин С.В., Анфимова И.Н. Особенности формирования адсорбционных центров термически модифицированных высококремнеземных пористых стекол // Физика и химия стекла. 2020. Т. 46. № 5. С. 475–481. DOI: 10.31857/S0132665120050121.

27. Нечипоренко А. П. Донорно-акцепторные свойства поверхности твердофазных систем. Индикаторный метод: учебное пособие / А.П. Нечипоренко. Санкт-Петербург: Лань. 2022. 284 с.

Информация об авторах

Неровная Софья Владимировна, аспирант кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: nerovnaya.sofya@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сивальнева Мариана Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор РАН, заведующий кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Огурцова Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Губарева Екатерина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: 43448504@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Клименкова Елизавета Вячеславовна, бакалавр кафедры материаловедение и технология материалов. E-mail: klimenkova.2003@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.09.2023 г.

© Неровная С.В., Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Огурцова Ю.Н., Губарева Е.Н., Клименкова Е.В., 2023

**Nerovnaya S.V., Sivalneva M.N., Strokova V.V., Ogurtsova Yu.N., Gubareva E.N., Klimenkova E.V.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: nerovnaya.sofya@yandex.ru*

ACID-BASE PROPERTIES OF THE SURFACE OF MICRO-REINFORCING FIBERS AS A COMPONENT OF A PHOTOCATALYTIC COMPOSITE MATERIAL FOR PLASTER MIXES

Abstract. The paper analyzes fibers of various types from the point of view of their potential use as a component of a photocatalytic composite material (PCM) of the composition "fibra – anatase", which is intended for use as an additive in order to create plaster coatings with the effect of self-cleaning. In order to

simulate the conditions of sol-gel deposition of TiO₂ on the carrier and the synthesis of anatase, the considered types of fiber were subjected to thermal exposure at 550 °C, as well as chemical treatment with various acids (nitric, acetic, formic). Most chemical and physical processes involving the surface of solids are local in nature and are largely determined by the energy parameters of specific active centers. In this regard, the criterion for assessing changes in the properties of the surface of various fibers as a photocatalyst carrier was the nature of the distribution of adsorption centers in the area of Brensted acids and the establishment of their quantitative concentration, determined using the indicator method. The positive effect on the activity of the fiber surface of the influences contributing to the modeling of the process of sol-gel synthesis of FCM was determined. The nature of the change in the total number of adsorption centers depending on the type of exposure and the type of fiber is established.

Keywords: *plaster mixes, self-cleaning, fiber, photocatalytic materials, acid-base properties*

REFERENCES

1. Majsner T.N. Urbanization and the ecology of the urban environment: risks and prospects for sustainable development [Urbanizaciya i ekologiya gorodskoj sredy: riski i perspektivy ustojchivogo razvitiya]. Humanitarians of the South of Russia. 2020. Vol. 9. No. 3. Pp. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.18522/2227-8656.2020.3.14>. (rus)
2. George C., Beeldens A., Barmpas F., Doussin J., Manganeli G., Herrmann H., Kleffmann J., Mellouki A. Impact of photocatalytic remediation of pollutants on urban air quality. *Frontiers of Environmental Science*. 2016. Vol. 10. No. 5. DOI: 10.1007/s11783-016-0834-1.
3. Yang L., Hakki A., Wang F., MacPhee D. Photocatalyst efficiencies in concrete technology: The effect of photocatalyst placement. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 222. Pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.10.013.
4. Amor F., Baudys M., Racova Z., Scheinherrová L., Ingrisova L., Hajek P. Contribution of TiO₂ and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. e00965. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00965.
5. Janczarek M., Klapiszewski Ł., Jędrzejczak P., Klapiszewska I., Slosarczyk A., Jesionowski T. Progress offunctionalized TiO₂-based nanomaterials in the construction industry: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. No. 3. 132062. DOI:10.1016/j.cej.2021.132062.
6. Falikman V.R. Nanocoatings in modern construction [Nanopokrytiya v sovremennom stroitel'stve]. *Nanotechnologies in construction*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 5–11. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-5-11. (rus)
7. Tyukavkina V.V., Cyryat'eva A.V. The structure of the cement stone modified by nanodispersed titanium-bearing additive [Struktura cementnogo kamnya, modifitsirovannogo nanodispersnoj titanosoderzhashchej dobavkoj]. *Proceedings of the fersman scientific session of Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. No. 16. Pp. 597–601. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.122. (rus)
8. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Postnikova O.A., Golovin S.N., Borovik E.G. The structure of cement stone with dispersed titanium dioxide in daily age [Struktura cementnogo kamnya s dispergirovannym dioksidom titana v sutochnom vozraste]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 11. Pp. 13–17. (rus)
9. Hela R., Bodnarova L. Research of Possibilities of Testing Effectiveness of Photoactive TiO₂ in Concrete [Issledovanie vozmozhnosti testirovaniya effektivnosti fotokataliza – TiO₂ v betone]. *Stroitel'nye materialy (Construction materials)*. 2015. No. 2. Pp. 77–81. DOI: 10.31659/0585-430X-2015-722-2-77-81. (rus)
10. Rudakova A.V., Oparicheva U.G., Grishina A.E., Kataeva G.V., Emelin A.V. Effect of photoinduced superhydrophilicity of the surface of metal oxides [Effekt supergidrofil'nosti poverhnosti oksidov metallov]. *Basic research*. 2013. No. 10. Pp. 1959–1962. (rus)
11. Emeline A.V., Rudakova A.V., Sakai M., Murakami T., Fujishima A. Factors affecting UV-induced superhydrophilic conversion of TiO₂ surface. *The Journal of Physical Chemistry*. 2013. Vol. 117. No. 23. Pp. 12086–12092. DOI: 10.1021/jp400421v.
12. Falikman V.R. About the use of nanotechnology and nanomaterials in construction. Part 1 [Ob ispol'zovanii nanotekhnologij i nanomaterialov v stroitel'stve. CHast' 1]. *Nanotechnologies in construction*. 2009. Vol. 1. No. 1. Pp. 24–34. (rus)
13. Antonenko M.V., Ogurtsova Yu.N., Stokova V.V., Gubareva E.N. Photocatalytic active self-cleaning cementbased materials. Compositions, properties, application [Fotokataliticheski aktivnye samoochishchayushchiesya materialy na osnove cementa. Sostavy, svoystva, primeneniye]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25 (rus)
14. Belova T.K. Plastering mortars with improved performance properties based on modified dry building mixtures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019. Vol. 11. No. 3. 32. (rus)

15. Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V. The use of the photocatalytic composite material in the cement system. *Construction materials*. 2019. No 5. Pp. 16–21. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21. (rus)
16. Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Labuzova M.V. Comparative evaluation of the activity of silica raw materials and photocatalytic composite material based on them [Sravnitel'naya ocenka aktivnosti kremnezemnogo syr'ya i fotokataliticheskogo kompozicionnogo materiala na ego osnove]. *Obogashchenie Rud*. 2019. No. 6. Pp. 25–30. (rus)
17. Strokova V.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N. Assessment of the properties of silica raw material as a support in composite photocatalytic material [Ocenka svoystv kremnezemnogo syr'ya kak podlozhki v sostave kompozicionnogo fotokataliticheskogo materiala]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No 2. Pp. 6–12. DOI: 10.12737/23819. (rus)
18. Balykov A.S., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Volodin S.V. Evaluating the effectiveness of mineral supplements in cement systems during development photocatalytic compositions “core-shell” [Ocenka effektivnosti mineral'nyh dobavok v cementnyh sistemah pri razrabotke fotokataliticheskikh kompozitsiy «yadro – obolochka»]. *Nanotechnologies in construction*. 2022. T. 14, No 5. Pp. 405–418. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-5-405-418. (rus)
19. Wang D., Hou P., Stephan D. Huang S., Zhang L., Yang P., Cheng X. SiO₂/TiO₂ composite powders deposited on cement-based materials: Rhodamine B removal and the bonding mechanism. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. 118124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118124.
20. Fatimah I., Prakoso N. I., Sahroni I., Miqdam Musawwa M., Sim Y., Kooli F., Muraza O. Physicochemical characteristics and photocatalytic performance of TiO₂/SiO₂ catalyst synthesized using biogenic silica from bamboo leaves. *Heliyon*. 2019. Vol. 5. No. 11. e02766. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02766.
21. Pal A., Jana T.K., Chatterjee K. Silica supported TiO₂ nanostructures for highly efficient photocatalytic application under visible light irradiation. *Materials Research Bulletin*. 2016. No. 76. Pp. 353–357. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.12.040.
22. Kozhuhova M.I., Knot'ko A.V., Sobolev K.G., Kozhuhova N.I. Microstructural features of hierarchical structure at repellent concrete surface [Mikrostrukturnye osobennosti formirovaniya ierarhicheskoy struktury na gidrofobizirovannoy poverhnosti betona]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 9. Pp. 6–9. (rus)
23. Antonenko M.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties of photocatalytic composite material. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 95. Pp. 16–22.
24. Bajdarashvili M.M., Saharova A.S. The study of the sorption properties of materials using physico-chemical method of adsorption sites distribution [Issledovanie sorbcionnykh svoystv materialov s pomoshch'yu fiziko-himicheskogo metoda raspredeleniya centrov adsorbtsii]. *Sorption and chromatographic processes*. 2020. Vol. 20. No. 1. Pp. 87–94. DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2383. (rus)
25. Lopanov A. N., Fanina E. A., Guzeeva O. N. Acid-base surface of the quartz sand in the technology of electrically conductive mixes [Kislotno-osnovnye centry poverhnosti kvarcovego peska v tekhnologii elektroprovodyashchih stroitel'nykh smesey]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No 5. Pp. 58–63. (rus)
26. Tsyganova T.A., Antropova T.V., Anfimova I.N., Mjakin S.V. Features of the formation of adsorption centers of thermally modified high-silica porous glasses [Osobennosti formirovaniya adsorbtsionnykh centrov termicheski modifitsirovannykh vysokokremnezemnykh poristykh stekol]. *Glass Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 46. No. 5. Pp. 475–481. DOI: 10.31857/S0132665120050121. (rus)
27. Nechiporenko A.P. Donor-acceptor properties of the surface of solid-phase systems. Indicator method: tutorial [Donorno-akceptornye svoystva poverhnosti tverdogaznykh sistem. Indikatornyy metod: uchebnoe posobie]. *Sankt-Peterburg: Lan'*. 2022. 284 p. (rus)

Information about the authors

Nerovnaya, Sofya V. Postgraduate student. E-mail: nerovnaya.sofya@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sivalneva, Mariana N. PhD, Assistant professor. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Strokova, Valeriya V. DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ogurtsova, Yuliya N. PhD, Assistant professor. E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gubareva, Ekaterina N. PhD. E-mail: 43448504@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Klimenkova, Elizaveta V. Bachelor student. E-mail: klimenkova.2003@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 25.09.2023

Для цитирования:

Неровная С.В., Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Огурцова Ю.Н., Губарева Е.Н., Клименкова Е.В. Кислотно-основные свойства поверхности микроармирующих фибр как компонента фотокаталитического композиционного материала для штукатурных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-8-19

For citation:

Nerovnaya S.V., Sivalneva M.N., Strokovaya V.V., Ogurtsova Yu.N., Gubareva E.N., Klimenkova E.V. Acid-base properties of the surface of micro-reinforcing fibers as a component of a photocatalytic composite material for plaster mixes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-20-34

Ряжских Б.Е.

Воронежский государственный технический университет

E-mail: boris_ryazhskikh@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ ОБЪЕМНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО БЛОКА 17-ЭТАЖНОГО ОБЪЕМНО-БЛОЧНОГО ЗДАНИЯ (ОБД)

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний статическим загрузением объемного железобетонного блока из серии 17-этажных многоквартирных домов, выполненных по технологии объемно-блочного домостроения (ОБД). Дан краткий обзор существующих исследований на тему объемно-блочного домостроения в частности и модульного строительства в целом. Обозначены основные факторы, сдерживающие применение данной технологии. Подробно описан порядок и этапы проведения испытания, а также конструкция испытательного стенда. Показано, из каких соображений назначена нагрузка при испытании и каким способом происходит ее моделирование. Приведена информация о применяемом оборудовании, датчиках и работе системы сбора данных. Приведены показания датчиков перемещений для каждого этапа нагружения, а также ширина раскрытия трещин при контрольных нагрузках. На основании полученных данных о ширине раскрытия трещин, а также деформациях стен блока была выполнена качественная и количественная оценка его прочности, жесткости и трещиностойкости. По результатам испытания получено, что блок удовлетворяет всем требованиям действующей нормативной документации. Последующее увеличение нагрузки сверх предельной по расчету показало, что несущая способность стен блока не менее, чем в 3,6 раз выше требуемой. Результаты испытаний позволяют сделать вывод о наличии достаточного запаса несущей способности, что открывает широкие возможности для применения технологии ОБД в высотном строительстве.

Ключевые слова: объемно-блочное домостроение, испытания конструкций, объемный блок, сборный железобетон, железобетонные конструкции, модульное строительство.

Введение. В современном мире в условиях повышенного спроса на жилье в крупных городах как никогда остро стоит вопрос снижения стоимости и повышения темпов жилищного строительства. Одним из способов достижения этого могут быть технологии модульного строительства, включающие в себя объемно-блочное домостроение (ОБД), многослойные клееные деревянные панели, легкие стальные тонкостенные конструкции и др.

Объемные (объемно-пространственные) блоки – крупная объемная конструкция, являющаяся функциональной структурной единицей здания в виде пространственной тонкостенной конструкции, обладающей необходимыми значениями прочности, жесткости и устойчивости, которая может являться: комнатой, лестничной клеткой, пространственной границей между помещениями. Применение объемных блоков позволяет достичь высокой степени заводской готовности здания (до 85 %) за счет предустановки оконных и дверных блоков, сантехнического оборудования, выполнения внутренней отделки помещений и других работ [1].

Технология ОБД была запатентована в 1931 году Ладовским Н.А. и Карауловым В.П., ими же была разработана каркасно-блочная система зданий. Дальнейшее развитие технология получила в 60–70-е гг. с началом серийного производства

объемных блоков и массового строительства жилья. Объемно-блочное строительство в те времена было новшеством, которое уменьшало себестоимость жилья, а также давало существенную экономию материалов и трудовых ресурсов [2].

Несмотря на то, что по данным экономического анализа применение объемных блоков в сравнении с крупнопанельным строительством позволяло уменьшить трудоемкость в 2–3 раза, сократить количество подъемов при монтаже в 4–5 раз, а экономия бетона достигает 28 %, широкого применения в СССР технология ОБД не нашла. Среди выделяемых причин: отсутствие больших крытых площадок для складирования, сложность и дороговизна производства и транспортировки блоков, отсутствие необходимого кранового оборудования [3].

На текущий момент на территории России существует лишь три предприятия, занимающиеся строительством зданий с применением объемно-блочной технологии. Наиболее молодое и современное из них находится в г. Воронеже. Более подробная информация об отечественных заводах ОБД отражена в работе [4].

Зарубежный опыт. В опыте зарубежного строительства тоже имеется немало примеров применения модульных зданий по той или иной технологии. Существенно продвинулись в этом вопросе в США, Великобритании, Германии, Канаде, Австралии, Сингапуре и Китае [5, 6].

Например, в 2003 году был построен жилой дом Raines Court, который был первым модульным жилым домом в Великобритании, за что был удостоен множества наград [7]. В 2013 году в Ситле, США компанией OneBuild был возведен семиэтажный модульный жилой дом, основной каркас которого был смонтирован в течение нескольких недель [8]. В Индии компания Hommission занимается возведением жилых домов по технологии ОБД. При этом изготовление и монтаж блоков для 20-квартирного пятиэтажного дома занимает 33 дня [9].

В работе [10] описывается возведение общественной школы в Бостоне, США. Применение пространственных сборных железобетонных конструкций позволило выполнить строительство за 108 дней к началу учебного года. Авторы также отмечают, что применение железобетонных конструкций в отличие от каркасных модулей делает здания более надежными и долговечными.

Исследованием вопроса целесообразности применения модульного строительства занимается ряд иностранных ученых. Например, Свэн Бертелсон в своем докладе [11] указывает, что применение модулей заводского изготовления может не только сократить стоимость строительства, но и существенно повысить качество. Однако, при этом автор поднимает вопрос ограниченности в архитектурных решениях, которая присуща сборному строительству и может испортить внешний облик города. Автор считает, что при разработке конструктивных решений нужно оставить пространство для изменения дизайна и архитектуры под нужды заказчиков.

В исследовании [12] авторы указывают основные преимущества применения модульных зданий по сравнению с монолитными. Помимо снижения стоимости строительства выделены следующие достоинства: высокая продуктивность, меньшая травмоопасность для строителей, снижение негативного влияния на окружающую среду.

Следует отметить, что в вопросе выбора технологии строительства большинство девелоперов отдают предпочтение монолитному железобетону, что наглядно видно на примере исследования [13], проведенного в Гонконге. Среди сборных железобетонных элементов наибольшее применение находят фасадные системы, лестничные марши, плиты перекрытия и балконные плиты. Остальные конструкции здания при этом чаще всего выполняются по месту на строительной площадке.

Причины слабого распространения модульного строительства проанализированы в работах

[14, 15], в которых были подробно описаны преимущества и недостатки технологии. Среди сдерживающих факторов были выделены: высокие начальные инвестиции, сложности с транспортировкой крупногабаритных модулей, сложность организации и координации строительного производства, отсутствие специалистов с необходимым опытом, а также нехватка нормативной базы.

В работе [16] проанализированы сдерживающие факторы, которые мешают распространению модульного строительства в Индии. Среди прочих автор выделяет: ограниченность архитектурных решений, сложность обеспечения требуемого качества монтажа конструкций на стройплощадке, предвзятость широких масс и отношение к сборному жилью как к низкого качества.

Недостаток нормативной базы, а также исследований, посвященных работе конструкций, отмечают также авторы работ [17, 18]. Нехватка работ, посвященных исследованию прочности, деформативности и устойчивости сборных блоков в составе многоэтажных зданий, не позволяет сформировать требуемую нормативную базу. Это, в свою очередь, сильно ограничивает область применения модульных зданий, как по этажности, так и по назначению.

Другие исследования по теме. Исследования, посвященные анализу работы объемных железобетонных блоков в составе здания, представлены скудно как в российской научной среде, так и за рубежом. В работе [19] выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния объемно-блочных конструкций в составе 17-этажного здания с учетом и без учета поэтапного возведения. Теми же авторами выполнен анализ работы платформенных стыков объемных блоков и методов их моделирования в расчетных моделях [20]. В исследовании [21] приведены результаты испытаний статическим нагружением объемных железобетонных блоков типа «колпак». В результате испытаний получена разрушающая нагрузка.

Отдельного внимания заслуживает исследование [22], в котором изучена работа зданий, выполненных по технологии ОБД, под воздействием динамических нагрузок от землетрясения. Авторы выполнили конечно-элементный анализ зданий различной этажности, а также рассмотрели различные типы соединений сборных блоков и их влияние на собственные частоты системы.

Объект испытаний. В ходе данного исследования были произведены испытания статическим нагружением объемного железобетонного

блока, изготовленного по новой серии 17-этажных жилых домов. Была выполнена качественная и количественная оценка его прочности и трещиностойкости. Результаты испытаний позволяют сделать вывод о наличии достаточного запаса несущей способности, что открывает широкие возможности для применения технологии ОБД в высотном строительстве.

Испытанный объемный железобетонный блок ОЖБ-7.1._-т изготовлен в соответствии с рабочей документацией на 17-этажные блок-секции серии ОБД-17 ООО «Инженерпроект». Объемный блок является конструкцией типового этажа секции и относится к типу «колпак». Он представляет собой монолитную железобетонную призматическую оболочку, имеющую 5 граней – четыре стены и потолок, плитой пола служит потолок нижележащего блока. Размеры блока в плане составляют 6000×3550 мм, высота объемного блока равна 2760 мм. Стены и перекрытия плоские, толщиной соответственно 100 и

160 мм. В двух смежных стенах предусмотрены дверные проемы шириной 910 и 1010 мм. В перекрытии блока расположено отверстие под вентиляционные блоки. Кроме того, имеется проем под балконный оконно-дверной блок шириной 1350 мм. Блок изготовлен из бетона класса В20. Опираение вышележащего блока на нижележащий выполняется через шов из цементно-песчаного раствора марки М200 толщиной 20 мм. Опалубочный чертеж показан на рисунке 1.

Армирование блоков выполняется сварными сетками с ячейкой 200×200 мм из арматуры класса А500С и проволоки Вр-1. Армирование перекрытий двухслойное, армирование стен однослойное с установкой сеток по середине толщины сечения. Требуемое по расчету дополнительное армирование стен и перекрытия, а также конструктивное армирование выполняется отдельными стержнями из арматуры класса А500С.

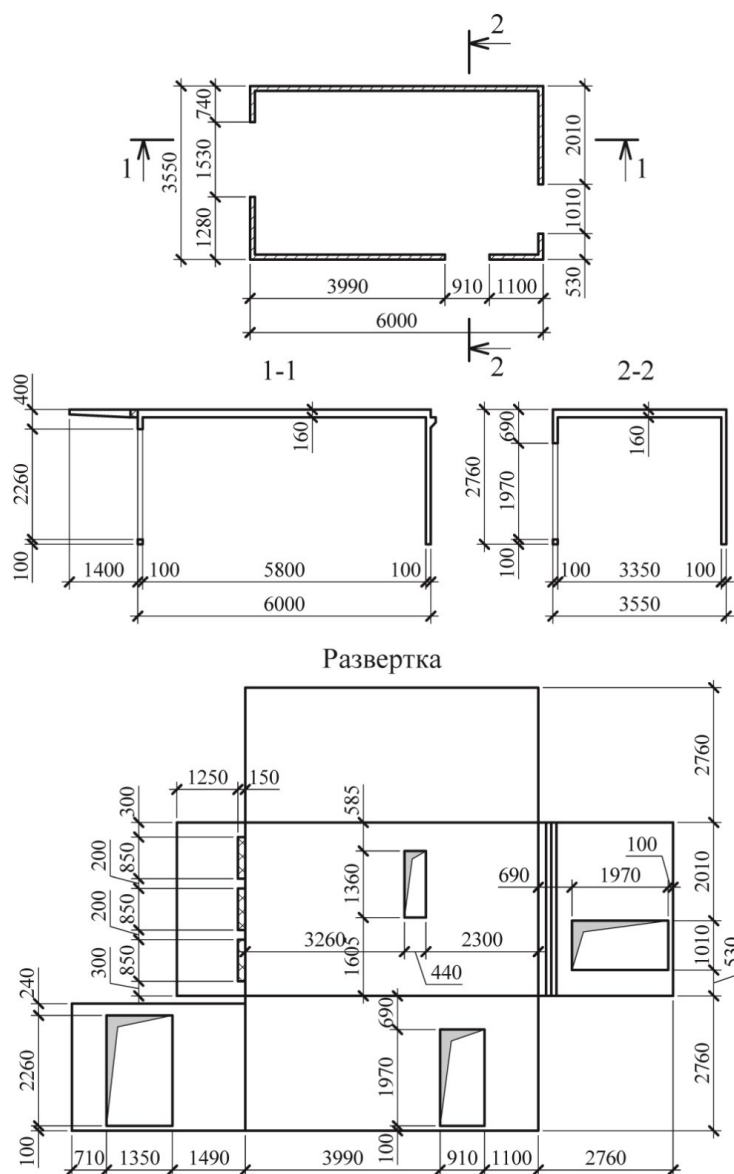


Рис. 1. Опалубочный чертеж блока ОЖБ-7.1._-т

Схема опирания и нагружения блока. В соответствии с заданием была разработана программа испытания объемного блока на вертикальные нагрузки. Она включала в себя сведения о применяемых средствах испытаний и вспомогательных устройствах, схемах опирания и нагружения блока, порядке проведения испытаний и подготовки к ним. Программа испытаний была составлена на основании проектной документации по объекту испытания – комплекту рабочих чертежей 17-этажных объемно-блочных блок-секций серии ОБД-17, ОБД-17-КЖ.И2, ООО «Инженерпроект».

Нагружение конструкции блока проходило в специально изготовленном испытательном стенде производства ООО «Выбор» (рис. 2). Стенд был специально сконструирован для проведения такого рода испытаний. Его конструкция состоит из четырехветвевых колонн, продольных и поперечных балок, а также силового фундамента, воспринимающего растягивающие нагрузки от колонн.

Для обеспечения передачи более точных усилий на испытываемый объемный блок нагружение производится через дополнительный блок того же типа, установленный сверху на растворном шве марки М200 (рис. 3).



Рис. 2. Испытуемый блок в испытательном стенде

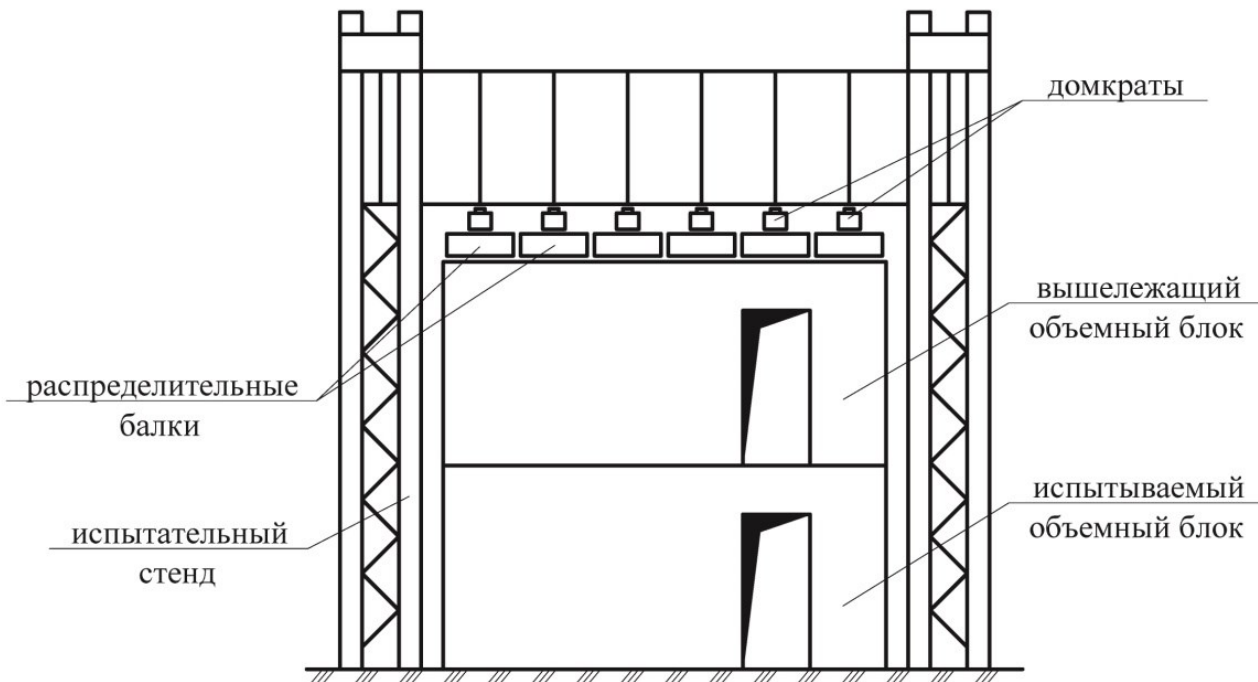


Рис. 3. Схема установки блока

Нагружение блока производилось вертикальной нагрузкой по его периметру, за исключением зон над дверными проемами. Принципиальная схема, согласно которой происходит нагру-

жение испытываемой конструкции, выбрана согласно проектной документации и представлена на рисунке 4. Такая схема приложения нагрузок моделирует нагрузки от вышележащих конструкций.

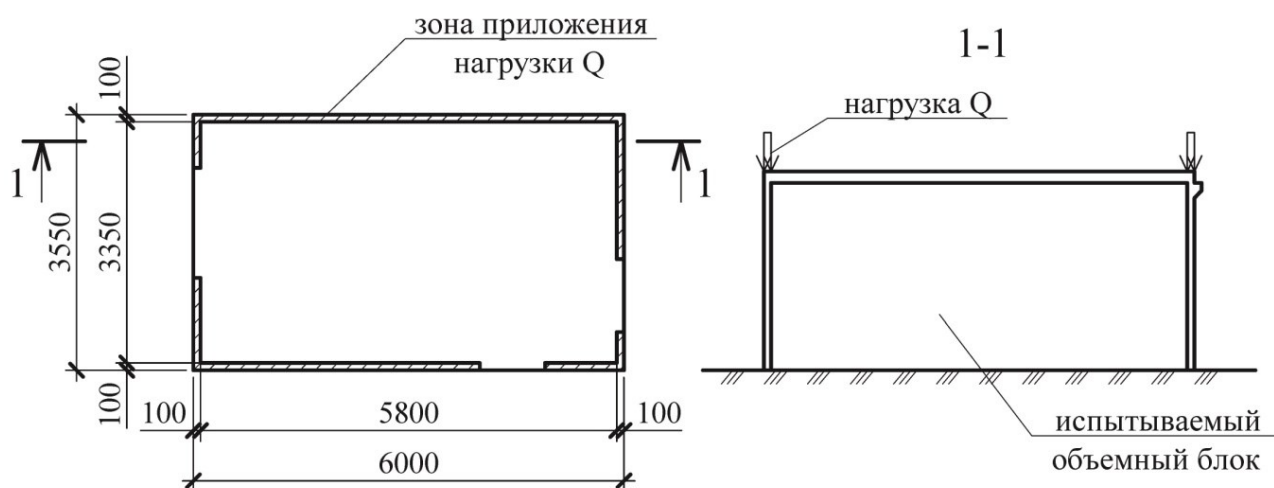


Рис. 4. Схема приложения нагрузки

Нагрузки для испытания были подобраны на основании результатов конечно-элементного моделирования секции многоэтажного здания в программном комплексе Лира-САПР (рис. 5).

При этом в модели было учтено взаимодействие секции с грунтом и с соседними секциями, поэтажное возведение и геометрическая нелинейность.

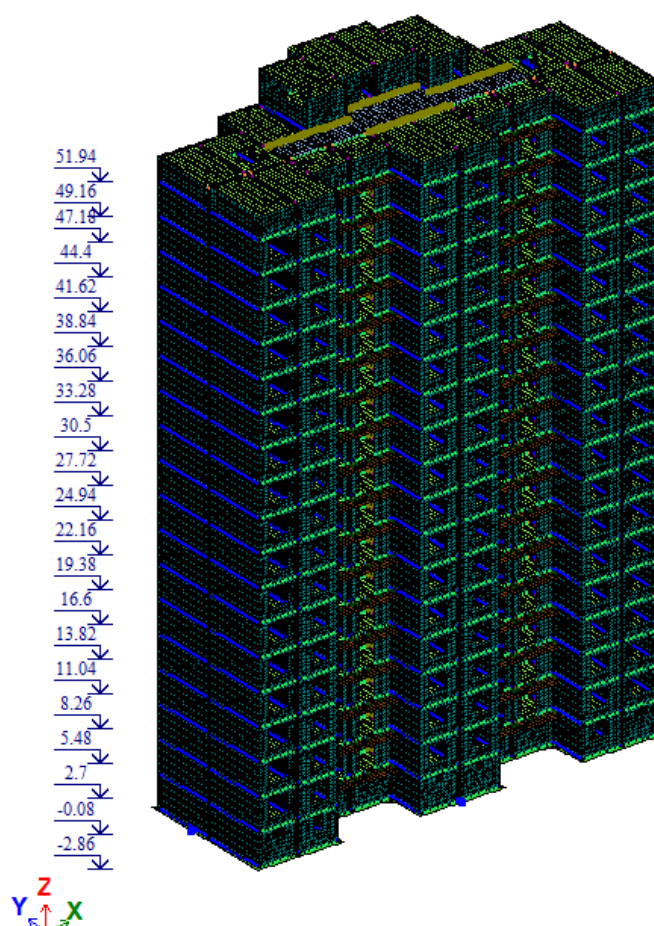


Рис. 5. Конечно-элементная модель секции здания

Моделирование нагрузки на стены блока происходило с применением гидродомкратов грузоподъемностью 300 тн производства ЗАО «Трансгидромаш» в количестве 16 штук.

Домкраты передают нагрузку на стены вышележащего блока через балки, что позволяет распределить нагрузки равномерно.

Следует отметить, что согласно расчету, нагрузка на стены не равномерная по периметру блока (рис. 6). Схема расположения загрузочных устройств, нумерации гидродомкратов и размеров балок под домкратами представлена на рис. 7.

Приложение нагрузок производилось в соответствии с порядком, указанным в таблице 1. Контрольной нагрузке по жесткости и раскрытию трещин соответствует этап 4, контрольной по прочности арматуры и прочности бетона – 7 и 11 этап соответственно.

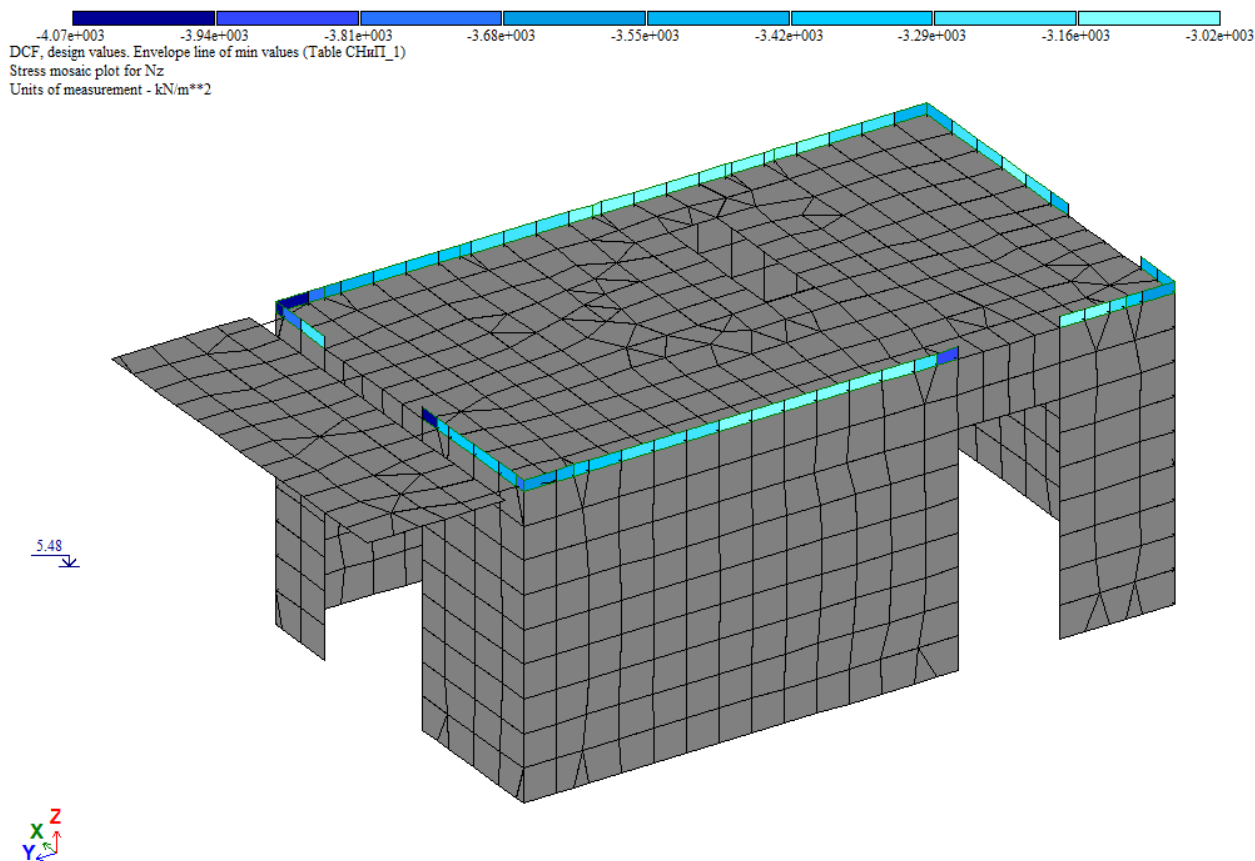


Рис. 6. Нагрузки на блок из расчетной схемы

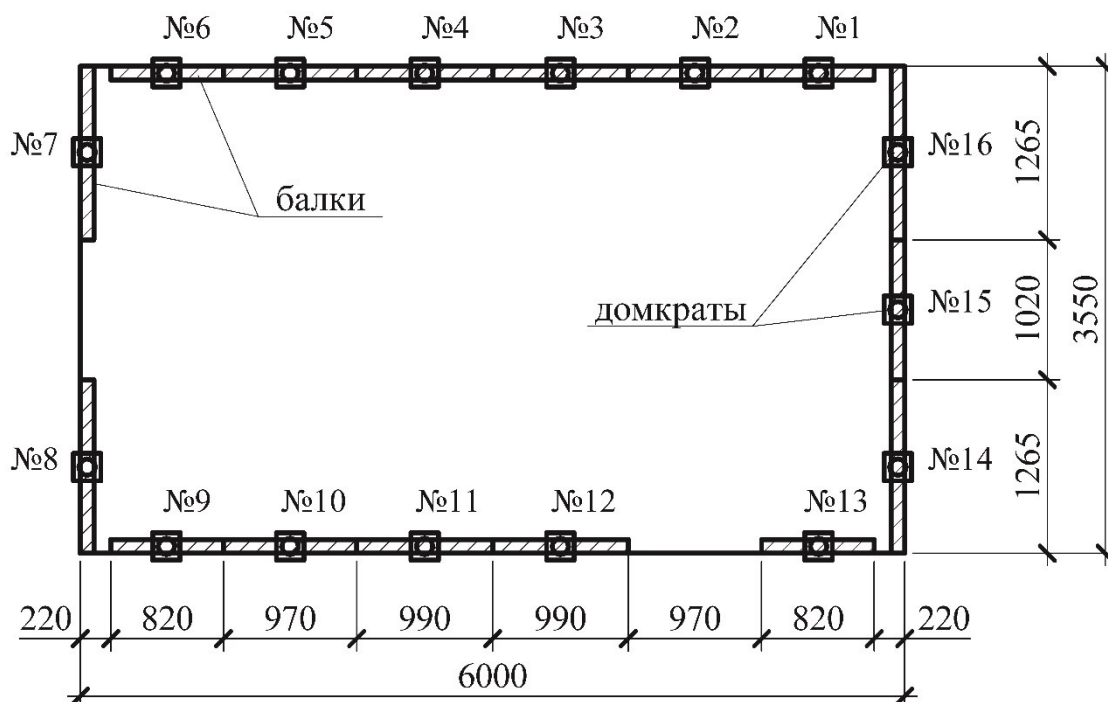


Рис. 7. Схема расположения домкратов и распределяющих балок

Таблица 1

Порядок приложения нагрузки на блок

№ п/п	Нагрузка на домкрате, т																	Σ
	Номер домкрата																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	27	24	24	19	14	12	12	19	12	14	19	27	27	14	24	37	322	
2	32	28	28	22	16	14	14	22	14	16	22	32	32	16	28	43	375	
3	36	32	32	25	18	16	16	25	16	18	25	36	36	18	32	50	429	
4	45	39	39	32	23	20	20	32	20	23	32	45	45	23	39	62	536	
5	54	48	48	38	27	24	24	38	24	27	38	54	54	27	48	75	648	
6	62	55	55	44	31	27	27	44	27	31	44	62	62	31	55	86	743	
7	65	57	57	46	33	28	28	46	28	33	46	65	65	33	57	89	774	
8	68	60	60	48	34	30	30	48	30	34	48	68	68	34	60	94	810	
9	72	63	63	50	36	32	32	50	32	36	50	72	72	36	63	99	858	
10	76	67	67	53	38	33	33	53	33	38	53	76	76	38	67	105	905	
11	80	70	70	56	40	35	35	56	35	40	56	80	80	40	70	110	953	
12	84	74	74	58	42	37	37	58	37	42	58	84	84	42	74	116	1001	
13	88	77	77	61	44	39	39	61	39	44	61	88	88	44	77	121	1048	
14	88	77	77	63	60	64	64	63	64	60	63	88	88	60	77	128	1183	
15	96	84	84	67	69	70	70	67	70	69	67	96	96	69	84	132	1292	
16	89	85	85	80	76	82	82	80	82	76	80	89	89	76	85	132	1367	
17	94	93	93	90	87	92	92	90	92	87	90	94	94	87	93	132	1500	
18	98	96	96	95	94	103	103	95	103	94	95	98	98	94	96	133	1592	
19	104	103	103	106	105	106	106	106	106	105	106	104	104	105	103	128	1701	
20	117	112	112	108	109	114	114	108	114	109	108	117	117	109	112	131	1812	
21	114	120	120	118	117	118	118	118	118	117	118	114	114	117	120	132	1892	
22	129	130	130	123	128	126	126	123	126	128	123	129	129	128	130	133	2042	
23	138	138	138	138	137	137	137	138	137	137	138	138	138	137	138	140	2204	

Измерительные приборы и оборудование.
Измерения деформаций и перемещений производились индуктивными датчиками линейных пе-

ремещений LVDT серии RM (рис. 8 и 9). Измерение ширины раскрытия трещин выполнялись с помощью микроскопов МПБ2 с ценой деления 0,05 мм.

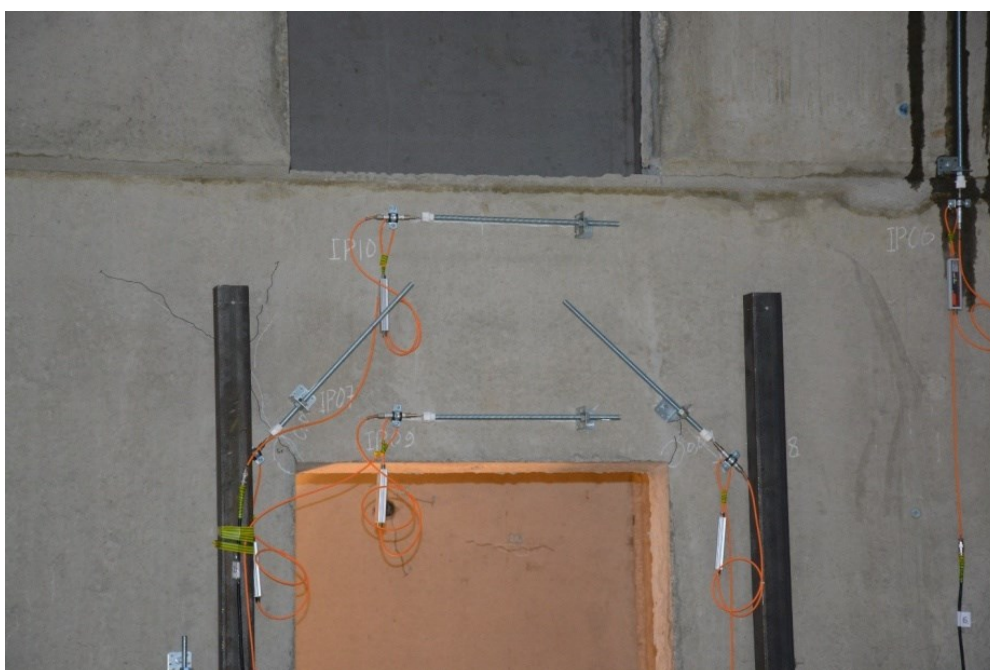


Рис. 8. Индукционные датчики в плоскости стен



Рис. 9. Индукционные датчики из плоскости стен

Все датчики были пронумерованы и расставлены в соответствии с проектной документацией. При этом для измерения деформаций в плоскости конструкций и на растворном шве были использованы датчики с ходом 2 мм, для измерения деформаций из плоскости конструкций – 10 мм, для регистрации предполагаемых трещин над проемами – 5 мм.

Для удобства всем стенам блока были даны наименования по сторонам света. Расстановка датчиков производилась в наиболее характерных местах. Вертикальные продольные деформации сжатия, а также выгибы стен фиксировались в средней трети стен по высоте. При этом особое

внимание уделялось узким простенкам, в которых согласно результатам расчетов, возникают наибольшие напряжения сжатия. По низу стен устанавливались датчики перемещений для фиксации смещений стен блока в плане. Над проемами датчики устанавливались горизонтально, а также под углом 45 градусов к горизонту для отслеживания ширины раскрытия трещин в перемычках. Для контроля деформаций сжатия в растворном шве между блоками установлены два датчика: в наиболее загруженных простенках. Нумерация и расположение датчиков перемещений представлены на рисунке 10.

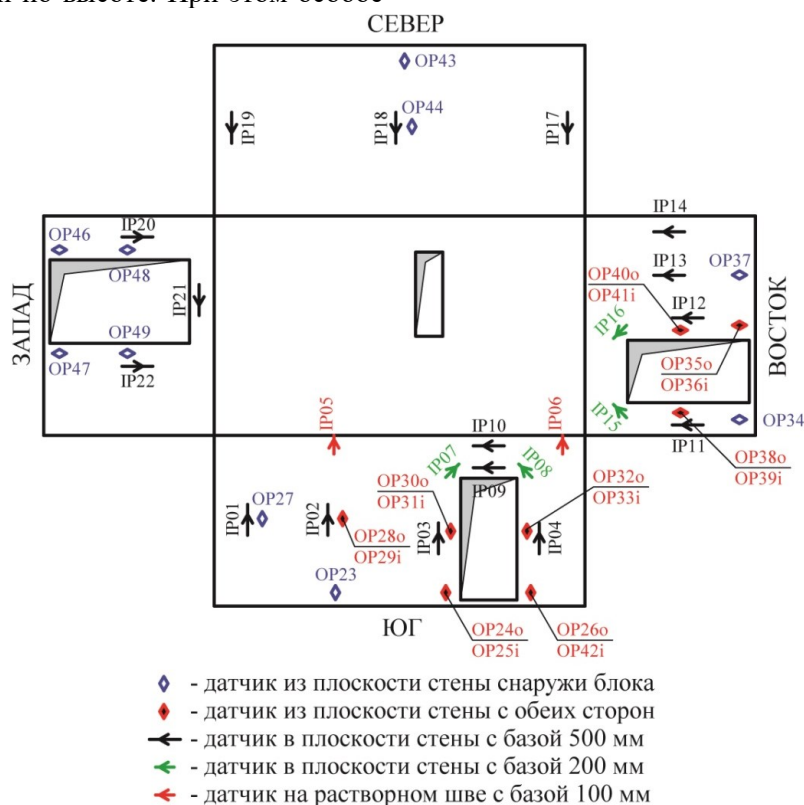


Рис. 10. Принципиальная схема расположения датчиков перемещений



Рис. 11. Система сбора данных в подключенном состоянии

Показания датчиков перемещений регистрировались с помощью многоканального измерительного комплекса (система сбора данных) TDS-530 (производство TML Ltd, Япония). Он предназначен для проведения автоматических измерений физических параметров при помощи системы датчиков. Измерительный комплекс оснащен базовым модулем с возможностью измерений по 30 каналам. Сигналы от датчиков передавались на многоканальный измерительный комплекс через систему экранированных кабелей. Время измерения сигнала по одному каналу составляет 0,04 с. Измерительный комплекс был

подключен к ноутбуку со специализированным программным обеспечением, позволяющим производить мониторинг измеряемых показателей в процессе испытаний (рис. 11).

Проведение испытаний и результаты. В процессе осмотра блока перед нагружением были выявлены раскрытые технологические трещины. Значения ширины раскрытия трещин не превышают предельно допустимых по ГОСТ 13015-2012.

Схема расположения трещин представлена на рисунке 12.

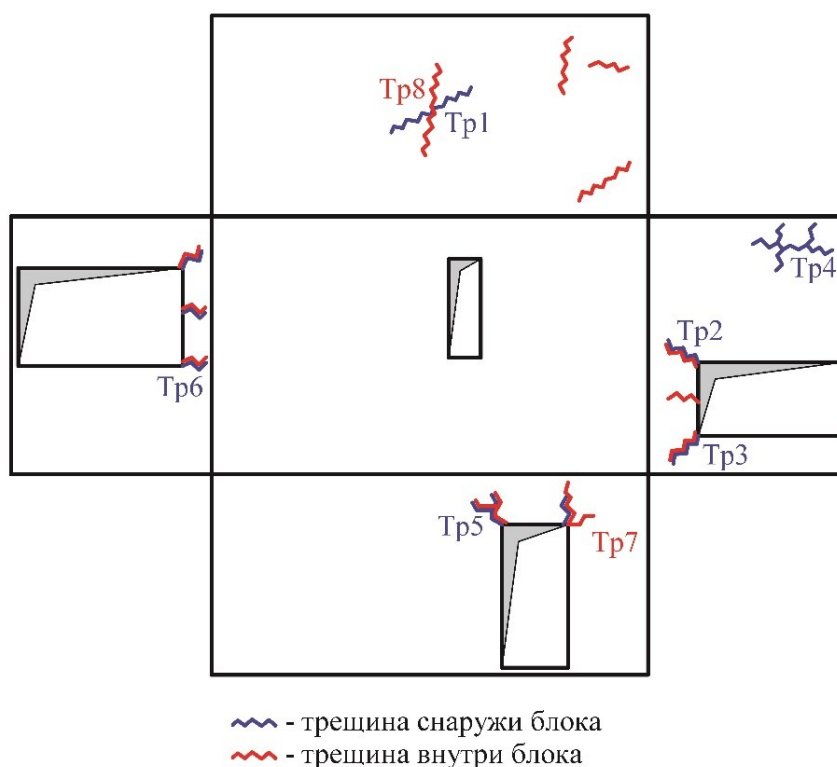


Рис. 12. Схема расположения трещин внутри блока

Значения ширины раскрытия основных трещин указаны в таблице 2.

Таблица 2

Ширина раскрытия трещин

№ трещины	Расположение	Ширина раскрытия трещины $a_{срс}$, мм			
		Этап 0	Этап 1	Этап 3	Этап 4
Тр1	Стена С – снаружи	0,15	0,15	0,15	0,15
Тр2	Стена В – снаружи	0,08	0,15	0,14	0,13
Тр3	Стена В – снаружи	0,08	0,05	0,05	0,04
Тр4	Стена В – снаружи	0,14	0,14	0,14	0,14
Тр5	Стена Ю – снаружи	0,35	0,30	0,28	0,30
Тр6	Стена З – снаружи	0,22	0,20	0,12	0,12
Тр7	Стена Ю – внутри	0,24	0,20	0,15	0,13
Тр8	Стена С – внутри	0,11	0,11	0,11	0,11

Сначала нагружение блока производилось до уровня, соответствующего суммарной контрольной нагрузке по жесткости и раскрытию трещин $q_1=536$ тн (этап 4). За всеми технологическими трещинами велось наблюдение. При этом значительного прироста в ширине раскрытия они не получили. Значение прироста ширины раскрытия не превышает предельно допустимое $a_{контр} \times 1,05 = 0,28 \times 1,05 = 0,294$ мм и кроме того не превышает нормируемое значение предельно допустимой ширины непродолжительного раскрытия трещин $a_{срс1}=0,4$ мм.

Деформации стен из плоскости регистрировались индуктивными датчиками перемещений с ходом 10 мм. Максимальный выгиб стены при контрольной нагрузке по проверке жесткости $q_1=536$ тн составил 0,86 мм на датчике ОР40, что значительно ниже предельно допустимого значения $h_s/500=2600/500=5,2$ мм по СП 20.13330.2016

«Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*».

Деформации стен в плоскости регистрировались индуктивными датчиками перемещений с базой 500 мм. Максимальная относительная деформация от сжатия при контрольной нагрузке по проверке жесткости $q_1=536$ тн составила $37,6 \cdot 10^{-5}$ на датчике IP12, что значительно ниже предельно допустимого значения $\varepsilon_{bt0}=200 \cdot 10^{-5}$ по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

Значит, стены блока удовлетворяют требованиям нормативной документации, предъявляемым к их жесткости.

Показания датчиков, расположенных в характерных местах, наглядно показаны на рисунках 13–16.

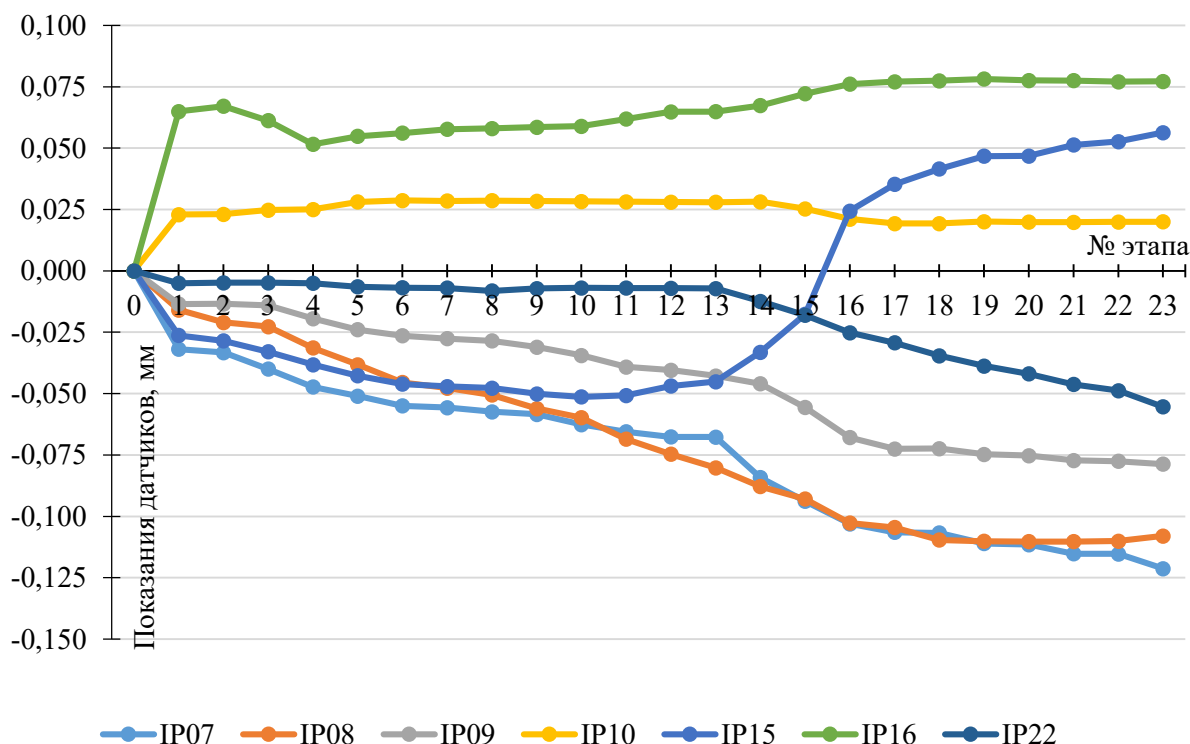


Рис. 13. Показания датчиков в месте предполагаемого образования трещин

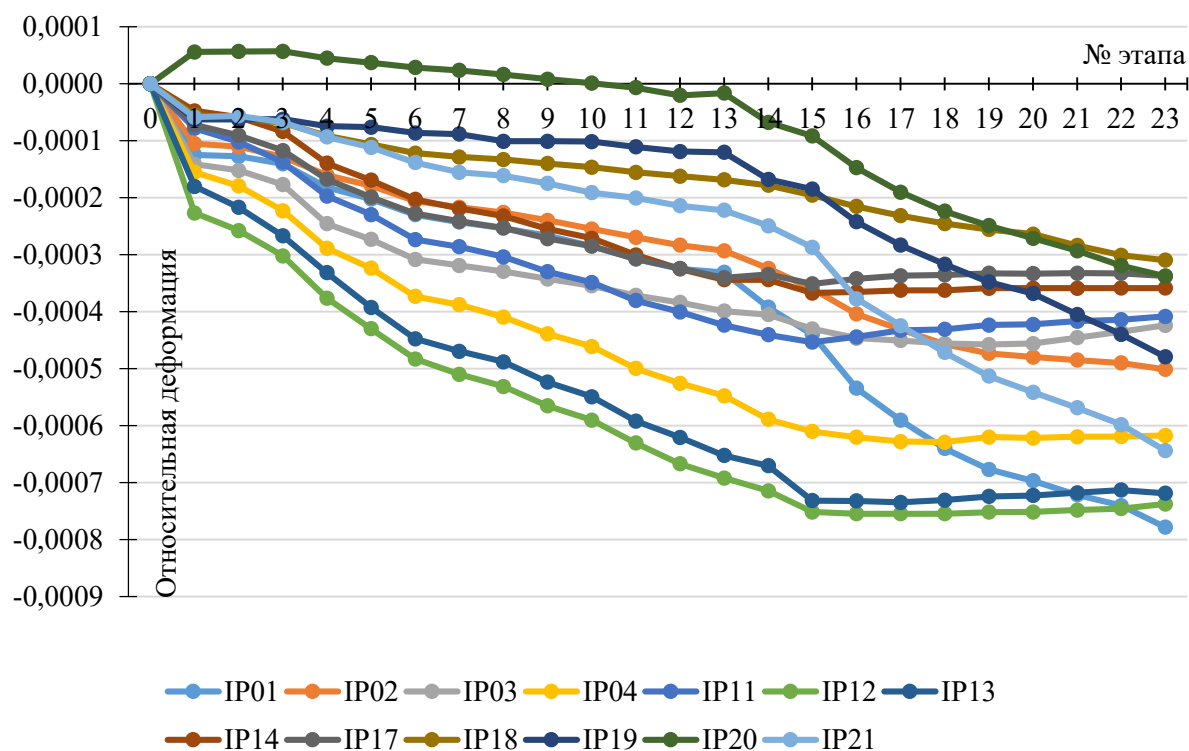


Рис. 14. Показания датчиков в плоскости стен

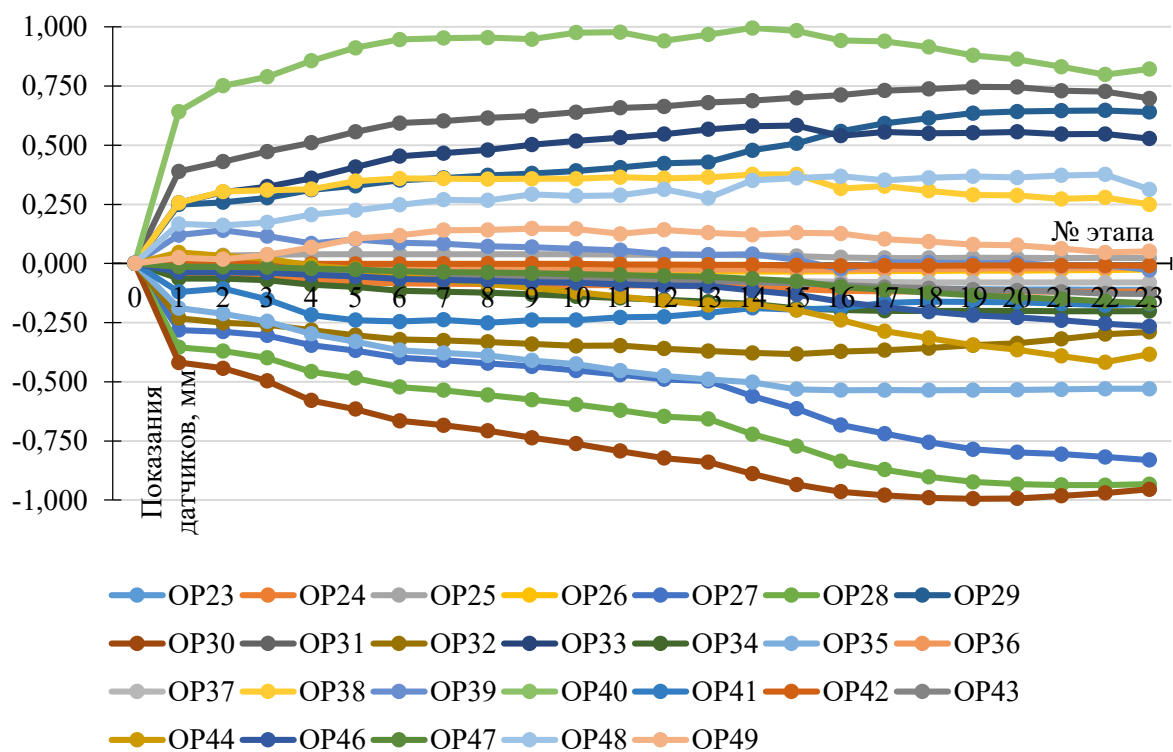


Рис. 15. Показания датчиков из плоскости стен

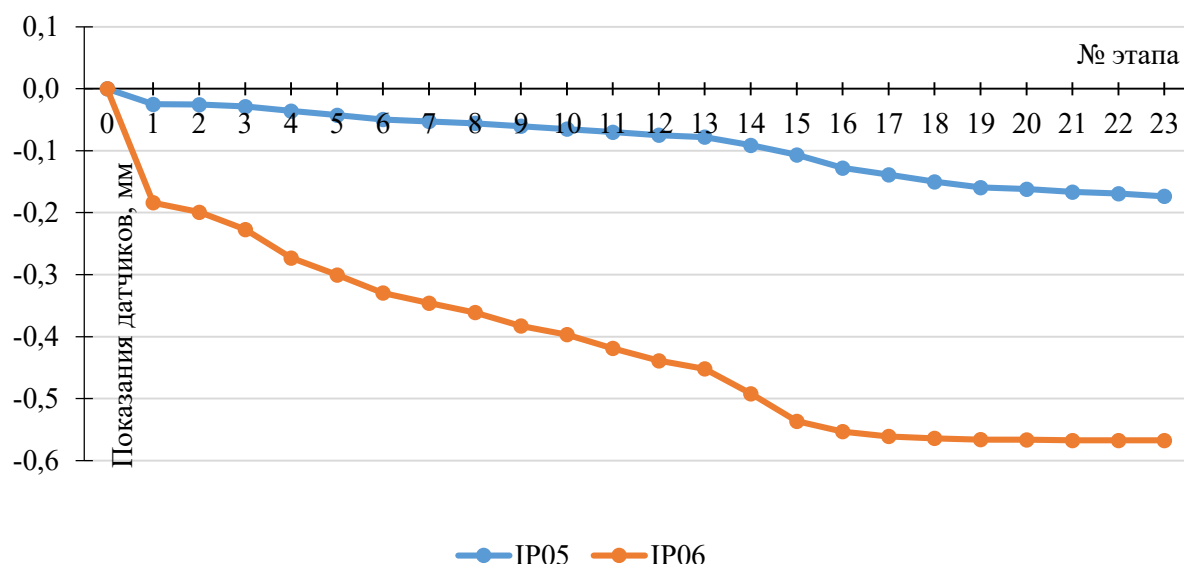


Рис. 16. Показания датчиков у растворного шва

Далее производилось нагружение блока до контрольной нагрузки по прочности для первого случая разрушения $q_2=774$ тн (этап 7). При этом разрушение по первому случаю не произошло.

При последующем нагружении была пройдена нагрузка, соответствующая второму случаю разрушения $q_3=953$ тн (этап 11). При этом разрушение по второму случаю не произошло.

После приложения нагрузки $q=2270$ тн произошло разрушение верхнего блока по первому случаю в месте приложения нагрузок от подомкратных балок на стене СЕВЕР.

Таким образом, достигнуть разрушающей нагрузки для испытываемого блока не удалось. Блок удовлетворяет предъявляемым требованиям по прочности.

Выводы. По результатам изучения документации, а также испытания стен блока ОЖБ-7.1. _т статическим нагружением и анализа полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

1. Прирост раскрытия трещин в стенах при контрольной нагрузке был незначительным и составил 0,05 мм, что не превышает предельно допустимого значения 0,294 мм. Таким образом, стены блока удовлетворяют требованиям рабочей и нормативной документации по трещиностойкости.

2. Максимальный выгиб стен из плоскости 0,86 мм при контрольном значении 5,2 мм. Наибольшая относительная деформация сжатия в плоскости стен составила $37,6 \cdot 10^{-5}$, что значительно ниже предельно допустимого значения $\varepsilon_{bt0}=200 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, стены блока удовлетворяют требованиям рабочей и нормативной документации по жесткости.

3. При суммарной нагрузке на блок 953 тн, соответствующей контрольной нагрузке по прочности по второму случаю разрушения, видимых следов разрушения растворного шва не обнаружено.

4. По достижении на блок контрольных нагрузок по прочности визуальных признаков разрушения обнаружено не было. Это говорит о соответствии блока требованиям рабочей и нормативной документации по прочности. Результаты последующего нагружения показывают, что коэффициент запаса прочности стен блока составляет не менее 3,6.

5. ОБД является перспективной технологией в многоэтажном жилищном строительстве. При этом несущая способность и трещиностойкость объемных железобетонных блоков различной конфигурации, а также их работа в составе зданий представляет собой обширное поле для последующих исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонова М.Г., Семенова Э.Е. История и тенденции развития объемно-блочного домостроения в России и за рубежом // Высокие технологии в строительном комплексе. 2019. №2. С. 37–43.
2. Хубаев А.О., Саакян С.С. Практика применения объемно-блочного домостроения в России // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. №3 (39). С. 112–119. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.03.10
3. Ализаде С.А. Объемно-блочное домостроение: опыт и перспективы развития // Архитектура и дизайн. 2017. №1. С. 38–52. DOI: 10.7256/2585-7789.2017.1.23079

4. Тешев И.Д., Коростелева Г.К., Попова М.А. Объемно-блочное домостроение // Жилищное строительство. 2016. №3. С. 26–33.
5. Goodier C.I., Pan W. The future of UK housebuilding // RICS research report. London: RICS, December 2010.
6. Pan W., Gibb A., Dainty A. Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods // Building research & information. 2008. Vol. 36 (1). Pp. 56–67. DOI: 10.1080/09613210701204013
7. Raines Court – Residential Projects – Allford Hall Monaghan Morris [электронный ресурс]. URL: <https://www.ahmm.co.uk/projects/residential/raines-court/> (дата обращения: 08.09.2023).
8. Apartment airlift in Belltown | Crosscut [электронный ресурс]. URL: <https://crosscut.com/2013/10/n-habit-stacks-49-prefab-units-belltown> (дата обращения: 08.09.2023).
9. Monolithic volumetric precast. Hommission [электронный ресурс]. URL: <http://www.hommission.com/pdf/E-Brochure.pdf> (дата обращения: 08.09.2023).
10. Smith M.A., Schreffler D., Messenger H. Precast concrete modules speed school construction // PCI Journal. 2000. Vol. 45 (4). Pp. 36–42. DOI: 10.15554/pcij.07012000.36.42
11. Bertelsen S. Modularization – a third approach to making construction lean? // 13th annual conference in the International Group for Lean Construction (July 2005). Sydney, 2005. Pp. 81–88.
12. Jadhav S., Kadam A., Dangat M., More S., Tanpure M. Analysing precast & modular construction with respect to design and cost // International Journal of Creative Research Thoughts. 2022. Vol. 10 (5). Pp. 644–649.
13. Jaillon L., Poon C.S. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector // Automation in Construction. 2009. Vol. 18. Pp. 239–248. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.09.002
14. Abdelmageed S.M., Abdelkhalek S., Zayed T. Benefits and Challenges of Modular Integrated Construction in Hong Kong: A Literature Review // The 8th International Conference on Construction Engineering and Project Management (7-8 December 2020). Hong Kong SAR, 2020.
15. Zhang X., Skitmore M., Peng Y. Exploring the challenges to industrialized residential building in China // Habitat International. 2014. Vol. 41. Pp. 176–184. DOI: 10.1016/j.habitatint.2013.08.005
16. Ar. Ravi Prakash Mishra. Review of prefabricated prefabricated Volumetric Construction and its application in India // International Journal of Research Publication and Reviews. 2022. Vol. 3. Pp. 568–573.
17. Gong T., Yang J., Hu H., Xu F. Construction technology of off-site precast concrete buildings // Frontiers of Engineering Management. 2015. Vol. 2 (2). Pp. 122–124. DOI: 10.15302/J-FEM-2015039
18. Pan W., Yang Y., Yang L. High-rise modular building: ten-year journey and future development // Construction Research Congress 2018 (2-4 April 2018). New Orleans: ASCE, 2018. Pp. 523–532. DOI: 10.1061/9780784481301.052
19. Саражинский А.С., Ефреюшин С.В. Исследование напряженно-деформированного состояния объемно-блочных конструкций с учетом стадийности возведения // Строительная механика и конструкции. 2022. №3 (34). С. 99–114. DOI: 10.36622/VSTU.2022.34.3.008
20. Саражинский А.С., Ефреюшин С.В. Анализ расчетных моделей платформенных стыков при проектировании конструкций объемно-блочных зданий // Строительная механика и конструкции. 2022. №1 (32). С. 69–81. DOI: 10.36622/VSTU.2022.32.1.006
21. Тамов М.А., Тамов М.М., Усанов С.В., Табагуа Г.Р. Прочность и трещиностойкость объемного блока типа “колпак” без панели пола // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3171>
22. Lago B.D., Volpe L., Papa E. Structural assessment of modular precast 3D cell mid- to high-rise buildings with different connections // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 44. Pp. 1068–1075. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.138

Информация об авторах

Ряжских Борис Евгеньевич, инженер-конструктор. E-mail: boris_ryazhskikh@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 12.09.2023 г.

© Ряжских Б.Е., 2023

Riazhsikh B.E.

Voronezh State Technical University

E-mail: boris_ryazhsikh@mail.ru

STATIC LOAD TESTING OF A VOLUMETRIC PRECAST REINFORCED CONCRETE MODULE OF A 17-STORY RESIDENTIAL MODULAR BUILDING

Abstract. The paper presents the results of static load tests of a volumetric precast reinforced concrete module of a 17-storey residential modular building. A brief overview of existing research on this topic is given. The main factors limiting the use of modular construction technology are identified. The procedure and stages of the test, as well as the design of the test facility are described in detail. Information about the sensors and other equipment used is provided, along with the description of the operation of the data logging system. The readings of linear position sensors for each loading stage are demonstrated, as well as the crack width at control loads. A qualitative and quantitative assessment of the strength, rigidity and crack resistance of the module is carried out. Based on the test results, it is found that the module satisfied all the requirements of building codes and other regulatory documentation. A subsequent increase in load shows that the load-bearing capacity of the module walls exceeded the required one at least 3.6 times. The test results demonstrate that there is a sufficient reserve of bearing capacity of modules, which opens up wide opportunities for the use of modular construction in high-rise buildings.

Keywords: precast concrete modules, prefabricated building, volumetric unit, precast reinforced concrete, prefabricated volumetric construction, 3D reinforced concrete structures, modular construction.

REFERENCES

1. Samsonova M.G., Semenova E.E. History and trends of development of volume-block housing construction in Russia and abroad [Istoriya i tendencii razvitiya ob'emno-blochnogo domostroeniya v Rossii i za rubezhom]. High technologies in construction complex. 2019. No. 2. Pp. 37–43. (rus)
2. Khubaev A.O., Saakyan S.S. The practice of application of volume-block building construction in Russia [Praktika primeneniya ob'emno-blochnogo domostroeniya v Rossii]. PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development. 2020. No. 3 (39). Pp. 112–119. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.03.10 (rus)
3. Alizade S.A. Prefabricated modular construction: experience and development prospects [Ob'emno-blochnoe domostroenie: opyt i perspektivy razvitiya]. Architecture and design. 2017. No. 1. Pp. 38–52. DOI: 10.7256/2585-7789.2017.1.23079 (rus)
4. Teshev I.D., Korosteleva G.K., Popova M.A. Space block house prefabrication [Ob'emno-blochnoe domostroenie]. Zhilishchnoe Stroitel'stvo. 2016. No. 3. Pp. 26–33. (rus)
5. Goodier C.I., Pan W. The future of UK housebuilding. RICS research report. London: RICS, December 2010.
6. Pan W., Gibb A., Dainty A. Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods. Building research & information. 2008. Vol. 36 (1). Pp. 56–67. DOI: 10.1080/09613210701204013
7. Raines Court – Residential Projects – Allford Hall Monaghan Morris [electronic source]. URL: <https://www.ahmm.co.uk/projects/residential/raines-court/>
8. Apartment airlift in Belltown Crosscut [electronic source]. URL: <https://crosscut.com/2013/10/n-habit-stacks-49-prefab-units-belltown>
9. Monolithic volumetric precast. Hommission [electronic source]. URL: <http://www.hommission.com/pdf/E-Brochure.pdf>
10. Smith M.A., Schreffler D., Messenger H. Precast concrete modules speed school construction. PCI Journal. 2000. Vol. 45 (4). Pp. 36–42. DOI: 10.15554/pci.07012000.36.42
11. Bertelsen S. Modularization – a third approach to making construction lean? 13th annual conference in the International Group for Lean Construction (July 2005). Sydney, 2005. Pp. 81–88.
12. Jadhav S., Kadam A., Dangat M., More S., Tanpure M. Analysing precast & modular construction with respect to design and cost. International Journal of Creative Research Thoughts. 2022. Vol. 10 (5). Pp. 644–649.
13. Jaillon L., Poon C.S. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector. Automation in Construction. 2009. Vol. 18. Pp. 239–248. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.09.002
14. Abdelmageed S.M., Abdelkhalek S., Zayed T. Benefits and Challenges of Modular Integrated Construction in Hong Kong: A Literature Review. The 8th International Conference on Construction Engineering and Project Management (7-8 December 2020). Hong Kong SAR, 2020.
15. Zhang X., Skitmore M., Peng Y. Exploring the challenges to industrialized residential building in China. Habitat International. 2014. Vol. 41. Pp. 176–184. DOI: 10.1016/j.habitatint.2013.08.005
16. Ar. Ravi Prakash Mishra. Review of prefabricated prefinished Volumetric Construction and its

application in India. International Journal of Research Publication and Reviews. 2022. Vol. 3. Pp. 568–573.

17. Gong T., Yang J., Hu H., Xu F. Construction technology of off-site precast concrete buildings. Frontiers of Engineering Management. 2015. Vol. 2 (2). Pp. 122–124. DOI: 10.15302/J-FEM-2015039

18. Pan W., Yang Y., Yang L. High-rise modular building: ten-year journey and future development. Construction Research Congress 2018 (2-4 April 2018). New Orleans: ASCE, 2018. Pp. 523–532. DOI: 10.1061/9780784481301.052

19. Sarazhinsky A.S., Efryushin S.V. Investigation of the stress-strain state of volumetric-block structures taking into account the stages of construction [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ob'emno-blochnykh konstrukcij s uchetom stadijnosti vozvedeniya]. Structural mechanics and structures. 2022. No. 3 (34). Pp. 99–114. DOI: 10.36622/VSTU.2022.34.3.008 (rus)

20. Sarazhinsky A.S., Efryushin S.V. Analysis of calculation models of platform joints when designing industrialized construction with apartment modules [Analiz raschetnykh modelej platformennykh stykov pri proektirovanii konstrukcij ob'emno-blochnykh zdaniy]. Structural mechanics and structures. 2022. No. 1 (32). Pp. 69–81. DOI: 10.36622/VSTU.2022.32.1.006 (rus)

21. Tamov M.A., Tamov M.M., Usanov S.V., Tabagua G.R. Strength and cracking resistance of module type 'cap' with no floor slab [Prochnost i treshchinostojkost ob'emnogo bloka tipa "kolpak" bez paneli pola]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. No. 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3171> (rus)

22. Lago B.D., Volpe L., Papa E. Structural assessment of modular precast 3D cell mid- to high-rise buildings with different connections. Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 44. Pp. 1068–1075. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.138

Information about the authors

Riazhsikh, Boris E. Structural Engineer. E-mail: boris_ryazhsikh@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya st., 84.

Received 12.09.2023

Для цитирования:

Рязских Б.Е. Испытания статической нагрузкой объемного железобетонного блока 17-этажного объемно-блочного здания (ОБД) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 20–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-20-34

For citation:

Riazhsikh B.E. Static load testing of a volumetric precast reinforced concrete module of a 17-storey residential modular building. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 20–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-20-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-35-41

Юрьев А.Г., *Панченко Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: Panchenko.bstu@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ НАЧАЛО В ТЕОРИИ СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В основе теории синтеза конструкций лежит принцип стационарного действия. Фундаментальное начало проекта конструкции составляет вариационный принцип синтеза с энергетическим содержанием. Изменение величин энергии внешних сил и потенциальной энергии деформации зависит не только от изменений перемещений и внутренних сил, что отражают принципы Лагранжа и Кастильяно, но и от вариантов конфигурации тела и модулей материалов. Влияние этих факторов на потенциальную энергию деформации обсуждается на примере растянутого стержня и стержневой системы. Дано обобщение теоремы Васютинского на случай системы с растянутыми и сжатými стержнями, что позволяет сделать переход от минимизации функционала потенциальной энергии деформации к минимизации объема материала. За рамками этой теоремы минимизация объема возможна лишь при наличии энергетического начала в дополнительном условии, что показывает двойственная постановка задачи на условный экстремум с интегральными связями. Это положение иллюстрируется на примере формирования двутаврового сечения консоли, нагруженной на конце моментом. При задании условия в виде относительного прогиба конца консоли двойственная постановка задачи имеет место. Она неприемлема в случае задания допустимого напряжения, исключаящего энергетическое содержание дополнительного условия.

Ключевые слова: стержневая система, синтез конструкций, вариационные принципы, минимум объема материала.

«К 100-летию идеи синтеза несущих конструкций»

Введение. Одной из главных проблем, стоящих перед строительной механикой, является осуществление проектирования конструкций на строго научной основе, что выражается в активном влиянии инженера на проект сооружения, подчинении создаваемой конструкции определенным требованиям. Эта проблема согласуется с основной задачей строительной механики, заключающейся в установлении зависимостей между параметрами композиции, силовыми и кинематическими характеристиками конструкции и фактором, явившимся причиной ее деформирования.

«Синтез конструкций» – термин, внесенный в механику деформируемого твердого тела членом-корреспондентом АН СССР И.М. Рабиновичем в 1924 году в работе «К теории вантовых ферм». При этом был отмечен односторонний характер науки в том отношении, что она ведет только анализ функционирования конструкций и не занимается их созданием. Потребовалось полвека, чтобы эта идея стала воплощаться в жизнь.

Характерной чертой большинства прикладных методов проектирования несущих конструкций является некий отход от общезначимых принципов. В задачах оптимального проектирования назначается целевая функция переменных параметров проекта. Принимаемый субъективный критерий оптимальности в виде экстремума

целевой функции традиционно имеет экономическую базу (например, минимум массы, стоимости). При таком подходе, как правило, не достигается глобальный экстремум функции. Экстремальная форма, основанная на базе отражения физических процессов, в данном случае получает непредвиденную самостоятельность и отклоняется от истинного воплощения [1–5].

В то же время стремление к отражению реальности вызывает поиск общих принципов, которые могут быть основой всех используемых в физике, в частности, в механике, закономерностей [6–10]. Универсальный метод достижения такого рода закономерностей основан на вариационном подходе [11–15].

Методика. Общефизическим принципом является принцип стационарного действия (по Гамильтону). Действие, представляющее собой интеграл по времени, содержит установленную на основе экспериментов функцию Лагранжа, имеющую энергетический смысл.

Рассмотрим случай, когда к телу поступает лишь механическая энергия (dT), кинетическая энергия не учитывается, а потенциальная энергия возникает только за счет деформации (dU). Уравнение закона сохранения энергии принимает вид:

$$dU - dT = 0. \quad (1)$$

При вариационном подходе ему соответствует уравнение:

$$\delta U - \delta T = \delta J. \quad (2)$$

При $\delta J = 0$, то есть, когда возможные приращения параметров (знак δ) совпадают с действительными (знак d), соблюдается закон сохранения энергии.

Из вариационных принципов, связанных с основным пространством состояний (напряжения, деформации, перемещения), наиболее известными являются принципы Лагранжа и Кастильяно, различающиеся дополнительными условиями, в общее число которых входят уравнения равновесия, совместности деформаций, статические и кинематические граничные условия, физический закон.

Функционал принципа Кастильяно называется дополнительной энергией системы. При использовании в дальнейшем линейно-упругом физическом законе она равна потенциальной энергии деформации.

Изменения величин U и T зависят не только от изменений перемещений и внутренних сил, как предусматривают принципы Лагранжа и Кастильяно, но и от вариантов конфигурации тела и модулей материала.

Конструкция обозначается конфигурацией и материалом. Конфигурацию конкретизируют топология, геометрия и параметры элементов. Топология предусматривает взаимосвязь элементов для геометрически неизменяемой структуры. Затем определяется геометрия системы. Наконец, находят размеры поперечных сечений стержней, толщины пластинок, оболочек и т. д.

Параллельно идет формирование материальной структуры путем определения модулей, коэффициентов анизотропии и других характеристик однородного материала или характеристик композитов. Ориентиром могут служить природные конструкции соответствующего типа.

Организмы, закрепляясь в естественной среде, используют информацию об окружающем пространстве в двух направлениях – в отношении нагрузок и наличия материальных источников. В живой природе материал в то же время и конструкция, так как он изначально конструктивно организован. Эту направленность рационально использовать и при создании технических систем.

Возвращаясь к композитам, следует отметить широкий диапазон их формирования. Этому посвящены отдельные исследования. Следует обратить внимание на так называемые армированные конструкции, когда матрица из хрупкого материала усиливается элементами, в достаточной мере противостоящими растяжению. Армирование может носить дискретный характер, когда используются, например, стержни, или дисперсный характер, когда элементы в виде волокон рассеиваются по объему матрицы [16].

Основная часть. Рассмотрим растяжение стержня с длинами участков l_1, l_2, l_3 и площадями поперечных сечений A_1, A_2, A_3 силами F (рис. 1).

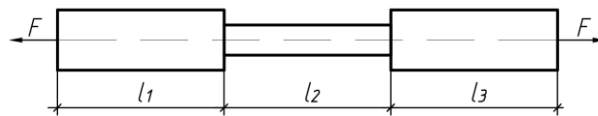


Рис. 1. Растянутый стержень

Потенциальная энергия деформации выражается формулой:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N^2 l_i}{2EA_i}, \quad (3)$$

где N – продольная сила ($N = F$); E – модуль продольной упругости; n – количество участков с длинами l_i и площадями поперечных сечений A_i .

Варьирование площадей A_i ведем в замкнутом пространстве, определяемом объемом:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i l_i. \quad (4)$$

При вариационной постановке задачи к функционалу Кастильяно присоединяется дополнительное условие (4):

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \frac{N^2 l_i}{2EA_i} + \mu \sum_{i=1}^n A_i l_i, \quad (5)$$

где μ – множитель Лагранжа, имеющий постоянную величину в рассматриваемой далее изопериметрической задаче.

Из условий стационарности: $\partial J_1 / \partial A_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$) с учетом, что $N_i / A_i = \sigma_i$ есть нормальное напряжение, следует:

$$\frac{\sigma_i^2}{2E} = \mu (= \text{const}), \quad (6)$$

или $\sigma_i = \text{const}$, то есть стержень имеет постоянное сечение.

Это подтверждает теорема Васютинского [17]: для линейно-упругого тела равенство напряжений идентично минимуму потенциальной энергии деформации. В данном случае она пропорциональна объему тела, минимум которого можно считать критерием оптимальности.

Принцип стационарного действия в органике прослеживается на клеточном уровне. Образование клетки – совмещение синхронных процессов: дифференциации (измельчения) и интеграции (слияния). Природа реализует ограниченное число форм, но она оптимально их сочетает. Чем мельче элемент, тем выше его вариационная сущность.

В 1970 г. канадский ученый П. Кенхэм произвел анализ совокупности виртуальных форм эритроцитов. Было установлено, что минимуму

потенциальной энергии деформации (U) соответствует двояковогнутый диск. Как раз эту форму и имеет эритроцит в статическом состоянии.

Возвратясь к стержню на рисунке 1 с площадью сечения A и модулями E_1, E_2, E_3 , определим замкнутое пространство условием:

$$EV = \sum_{i=1}^n E_i A l_i. \quad (7)$$

Функционал Кастильяно принимает вид:

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2 E_i A} + \mu \sum_{i=1}^n E_i A l_i. \quad (8)$$

Из условий стационарности: $\delta J_2 / \delta E_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$) следует:

$$\frac{N_i^2 l_i}{2 E_i^2 A} + \mu A l_i = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

или

$$\frac{\sigma^2}{2 E_i^2} = \mu (= \text{const}). \quad (10)$$

Поскольку $\sigma = N/A = \text{const}$, имеем $E_i = \text{const}$, то есть действительным является вариант стержня из однородного материала. Этот результат также находится в рамках теоремы Васютинского.

Изложенную вариационную постановку проектной задачи можно использовать для стержневой системы, которая представляется как виртуальная система с внутренними силами N_i / φ_i , где φ_i – коэффициент устойчивости.

Рассмотрим изопериметрическую задачу с варьируемыми площадями поперечных сечений стержней A_i при условии (4), где теперь l_i – длина стержня, число которых n .

В данном случае функционал Кастильяно имеет вид:

$$J_3 = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2 E \varphi_i^2 A_i} + \mu \sum_{i=1}^n A_i l_i. \quad (11)$$

Следствия стационарности функционала J_3 : уравнение (4) и уравнения из условий $\delta J_3 / \delta A_i = 0$, то есть

$$-\frac{N_i^2}{2 E \varphi_i^2 A_i^2} + \mu = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (12)$$

Так как $N_i / (\varphi_i A_i)$ представляет собой квазинатяжение $\bar{\sigma}_i$, то уравнение (12) принимает вид:

$$\frac{\bar{\sigma}_i^2}{2 E} = \mu (= \text{const}), \quad (13)$$

свидетельствующий о квазиравнонапряженности однородной стержневой системы, то есть со своим напряжением в каждой группе (растянутых, сжатых) стержней.

Приняв расчетное сопротивление материала R , получаем

$$A_i = \frac{N_i}{\varphi_i R}. \quad (14)$$

Переходим к свободной вариационной задаче с функционалом

$$U = \frac{R}{2E} \sum_{i=1}^n \frac{N_i l_i}{\varphi_i}, \quad (15)$$

который можно использовать при оптимизации структуры стержневой растянуто-сжатой системы. Введем в формулу (15) на основании зависимости (14) вместо величины N_i / φ_i величину $R A_i$:

$$U = \frac{R^2 V}{2E}. \quad (16)$$

Минимум энергии U сопряжен с минимумом объема материала V (обобщение теоремы Васютинского).

Обобщенная теорема Васютинского позволяет сделать переход от минимизации функционала, основанного на потенциальной энергии деформации, к минимизации функционала, в основу которого положен объем материала, при соблюдении устойчивости равновесия.

Однако, положенная в основу теоремы равнонапряженность не всегда достижима [18, 19]. В первую очередь это касается элементов, испытывающих изгиб и кручение.

Помимо этого, абсолютный (глобальный) минимум объема достижим лишь при присутствии энергетического признака в дополнительном условии, что следует из двойственности вариационных задач с интегральными связями [20].

Изопериметрическая задача определения конфигурации системы выявляет такое распределение материала объемом V_0 , при котором достигается абсолютный минимум потенциальной энергии при вариации векторов функций перемещений $\vec{q}$ и конфигурации $\vec{\Psi}_c$. Функционал представляется в виде:

$$\tilde{J} = J(\vec{q}, \vec{\Psi}_c) + \mu_1 [V(\vec{\Psi}_c) - V_0]. \quad (17)$$

Но можно исходить из величины потенциальной энергии J_0 , чтобы представить конфигурацию из условия стационарности функционала объема $V(\vec{\Psi}_c)$, записанного в виде:

$$\tilde{V} = V(\vec{\Psi}_c) + \mu_2 [J(\vec{q}, \vec{\Psi}_c) - J_0]. \quad (18)$$

Двойственной постановке задачи соответствует равенство: $\mu_2 = 1/\mu_1$, которое видоизменяет формулу (18):

$$\tilde{V} = \mu_2 [J(\vec{q}, \vec{\Psi}_c) - J_0 + \mu_1 V(\vec{\Psi}_c)]. \quad (19)$$

Решения задач с функционалами (17) и (19) совпадают с точностью до постоянного множителя μ .

Первостепенность энергетического начала продемонстрируем на двух примерах [20]. Они относятся к консоли длиной $l=2$ м, нагруженной на конце моментом M равным 50 кН·м. Сечение имеет форму двутавра с заданными толщиной стенки 2,2 см и высотой полки 1 см. Модуль упругости равен $2 \cdot 10^5$ МПа. Подлежат определению высота сечения и ширина полки.

В первом примере задан относительный прогиб конца консоли 0,006, являющийся производной функцией от энергии. Сначала на основании заданного условия определена площадь поперечного сечения. Затем решена изопериметрическая задача при заданной площади сечения с использованием функционала Кастильяно. Двойственная постановка задачи обеспечила совпадение решений: 29,32 см и 1,07 см соответственно.

Во втором примере задано допустимое напряжение 160 МПа, не имеющее энергетического смысла. После аналогичной процедуры получены несовпадающие решения: 22,6 см и 29,13 см для высоты сечения, 8,26 и 1,08 см для ширины полки.

При расчете конструкций обычно имеют место противоречивые установки: переход от строгой теории к численным методам, упрощение диаграммы материала и др., что требует обоснованных упрощений. Это находит отражение в так называемой расчетной схеме конструкции – упрощенной схеме, отражающей ее основные данные.

Модель структурного синтеза приемлет эти установки и дополняет их специфическими параметрами и функциями, а также информацией о вариации внешних связей. Упрощениями является квазистатический характер внешних сил и однократное нагружение.

В ряде случаев оправдывают себя дискретные модели тел. Континуальной системе отвечает модель, включающая дискретные параметры. Это сочетается с методами математической дискретизации.

Выводы. Синтез конструкций преследует установление конфигурации (топологии, геометрии, параметров элементов) и подбор материалов. Немаловажную роль играет выбор объективного критерия рационального проектирования, который должен иметь энергетическое начало. Вариационная постановка задачи синтеза несущих конструкций позволила произвести обобщение теоремы Васютинского на линейно-упругие системы с растянутыми и сжатыми стержнями, что несколько расширяет область использования привычного критерия минимума объема материала. Однако обозначенная в теореме равнонапряженность недостижима для элементов, испыты-

вающих изгиб и кручение. Приемлемость критерия минимума объема устанавливается на основе возможности двойственной реализации задачи на условный экстремум с интегральными связями. В других случаях неизбежно непосредственное использование вариационных принципов синтеза конструкций.

Теоретически оптимальная конструкция не отражает утилитарные факторы: методы производства работ, сроки производства и другие обстоятельства, которые не поддаются учету в виде дополнительных условий. При реализации проекта это можно корректировать посредством внесения изменений в конфигурацию или состав материалов. Но даже тогда, когда из-за сложностей технологического характера реализация проекта ограничивается, само представление оптимальной конструкции имеет важное значение, поскольку создает возможность оценить качество существующих конструкций такого рода. Могут быть случаи, когда используемые на практике конструкции оказываются близкими к оптимальным и их совершенствование не оправдывается по экономическим соображениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Том 15. Вып.1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
2. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2020. №1. С. 95–108. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108.
3. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия вузов. Строительство. 2021. №6. С. 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.
4. Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А. Структурный синтез стержневых систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №10. С. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40.
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. №3. Pp. 293–301.
6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.
7. Ширалиев С.Д., Боинская А.А., Мищенко А.В. Исследование критериев рациональности многопролетных балок // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. №1. С. 9–14.

8. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ, 2011. Т.42. Вып.2. С. 1–12.
9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No. 71 (2). Pp. 197–224.
10. 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.
11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.
12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem // Structural Optimization. 1989. No. 1. Pp. 193–202.
13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.
14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design // Advances in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topology optimization // Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.
16. Панченко Л.А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №1. С. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50.
17. 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.
18. Мищенко А.В. Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней // Вестник МГСУ. 2014. №5. С. 35–43.
19. Мищенко А.В. Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. №4. С. 42–51.
20. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 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.

Панченко Лариса Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 15.06.2023 г.

© Юрьев А.Г., Панченко Л.А., 2023

Yuriev A.G., *Panchenko L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov

**E-mail: Panchenko.bstu@mail.ru*

ENERGY BEGINNING IN THE THEORY OF STRUCTURE SYNTHESIS

Abstract. *The theory of construction synthesis is based on the principle of stationary action. The fundamental beginning of the design of structure is the variational principle of structural synthesis with energy content. The increment in the energy of external forces and the potential energy of deformation depends not only on the increments of displacements and internal forces, as provided by the principles of Lagrange and Castigliano, but also on the changes of configuration body and materials modules. The influence of these factors on the potential strain energy is discussed on the example of a tensioned rod and a rod system. A generalization of Vasyutinskii's theorem to the case of a system with stretched and compressed rods is given, which makes it possible to make a transition from minimizing the potential strain energy functional to minimizing the volume of material. Outside of this theorem, volume minimization is possible only when the energy principle is introduced into an additional condition, as evidenced by the dual substitution of the problem for a conditional extremum with integral connections. This situation is illustrated by the example of the formation of an I-section of a console loaded at the end with a moment. When the condition is set in the form of a relative deflection of the end of the console, the dual substitution of the problem takes place. It is unacceptable in the case of setting the admissible stress, excluding the energy content of the additional condition.*

Keywords: *Rod system, structural synthesis, variational principles, minimum of material volume.*

REFERENCES

1. Tamrazjan A.G., Alexejtsev A.V. Modern methods of constructive decisions optimization for supporting systems of buildings and structures [Sovremennye metody optimizacii konstruktivnyh reshenij dlya nesushchih sistem zdanij i sooruzhenij]. Bulletin of MGSU. 2020. Vol. 15. No. 1. Pp. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. (rus)
2. Kryzhevich G.B., Filatov A.P. Complex approach to topology optimization of vessel constructions [Kompleksnyj podhod k topologicheskoy optimizacii sudovyh konstrukcij]. Proceedings of the Krylov's State Scientific Center. 2020. No. 1. Pp. 95–108. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108. (rus)
3. Mishchenko A.V. Optimization of structural inhomogeneous pivotal systems on the basis of energetic criterion [Optimizaciya strukturno-neodnorodnyh sterzhnevnyh konstrukcij na osnove energeticheskogo kriteriya]. News of institutions of higher education. Building. 2021. No. 6. Pp. 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. (rus)
4. Yuriev A.G., Panchenko L.A., Zinkova V.A. Construction synthesis of pivotal systems [Stukturnyj sintez stergnevnyh sistem]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No.10. Pp. 34–40. (rus)
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. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.
7. Shiraliev S.D., Boinskaya A.A., Mishchenko A.V. Research of rationality criterions of multi-span beams [Issledovanie kriteriev racional'nosti mnogoproletnyh balok]. Housing Economy and Municipal Infrastructure. 2020. No. 1. Pp. 9–14. (rus)
8. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. Algorithms for optimizing the topology of power structures [Algoritmy optimizacii topologii silovyh konstrukcij]. Scientific Notes of CAGI, 2011. Vol. 42. No. 2. Pp. 1–12. (rus)
9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No. 71 (2). Pp. 197–224.
10. 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.
11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.
12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. Structural Optimization. 1989. No 1. Pp. 193–202.
13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.
14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design. Advances in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topologie optimization. Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.
16. Panchenko L.A. Calculation of fiber-concrete constructions with regard to physical nonlinearity [Raschet fibrobetonnyh konstrukcij s uchetom fizicheskoy nelinejnosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50. (rus)
17. 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.
18. Mishchenko A.V. Designed model nonlinear dynamic deformation of component multiphase pivots [Raschetnaya model' nelinejnogo dinamicheskogo deformirovaniya sostavnyh mnogofaznyh sterzhnej]. Bulletin of MGSU. 2014. No. 5. Pp. 35–43. (rus)
19. Mishchenko A.V. Nonlinear thermoelastic deformation of multiphase pivots [Nelinejnoe termouprugoe deformirovanie mnogofaznyh sterzhnej]. Structure Mechanics of engineering constructions. 2014. No. 4. Pp. 42–51. (rus)
20. Yuriev A.G. Variational principles of structure mechanics [Variacionnye principy stroitelnoj mekhaniki]. Belgorod: Publishing house BelGTASM, 2002. 90 p. (rus).

Information about the authors

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

Panchenko, Larisa A. PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

Received 15.06.2023

Для цитирования:

Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Энергетическое начало в теории синтеза конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-35-41

For citation:

Yuriev A.G., Panchenko L.A. Energy beginning in the theory of structure synthesis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-35-41

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д.Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова***E-mail: n-savvin@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА КОНДЕНСАТОРА ПРОМЫШЛЕННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Аннотация. Рассматривается современный способ исследования потоков жидкости посредством компьютерного моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation. В качестве исследуемого объекта выступает модель пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины. В статье приведено сравнение эффективности теплообмена при работе вентиляторов при различных частотах вращения крыльчатки. Даны общие сведения об использовании SolidWorks Flow Simulation применительно к моделированию процесса охлаждения пластинчатого теплообменника. Применение плавного регулирования частоты вращения каждого из вентиляторов конденсатора обеспечивает такую же эффективность охлаждения, как и при дискретном запуске меньшего количества вентиляторов при номинальной частоте вращения, однако в первом случае может быть достигнута большая энергоэффективность. Проведены исследования, в результате которых получены значения частот вращения вентиляторов пластинчатого теплообменника конденсатора холодильной машины при различных конфигурациях вентиляторов. Эти величины необходимы для дальнейшего компьютерного моделирования системы управления вентиляторами на базе преобразователя частоты и выявления закономерностей между снижением частоты вращения электродвигателей вентиляторов и снижением их энергопотребления. Установлено, что применение SolidWorks Flow Simulation является мощным инструментом для симуляции низкоскоростных потоков, обеспечивающий параллельное проектирование и, позволяя радикально изменить анализ потока жидкости и теплообмена.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат, конденсатор, холодильная машина, параметрическое моделирование потока, SolidWorks, вычисления гидродинамики.

Введение. Рост потребности в области производства промышленного и бытового холода требует разработки эффективных мер по снижению энергопотребления холодильных установок как с помощью оптимизации работы системы управления, так и с помощью изменений в гидравлической системе установки.

Согласно оценкам Международного института холода, искусственное охлаждения (включая кондиционирование воздуха) потребляет около 17 % всей используемой в мире электроэнергии. Такая оценка МИХ базируется на анализе фрагментарных данных о потреблении энергии по секторам в разных районах мира [1].

Опираясь на данные, приведенные в статье «Оценка энергоэффективности холодильных установок и систем», опубликованной в журнале «Холодильная техника», только промышленные потребители энергии в Российской Федерации смогут экономить по оплате счетов до 14 млрд долл. США в год, если начнут применять энергосберегающее оборудование и технологии, а также устранят очевидные потери энергии при ее передаче [2]. Наибольшей энергоэффективности можно достичь в случае проведения оптимизационных мероприятий, затрагивающих все узлы холодильной машины.

Распределительные холодильники, хладокомбинаты и производственные холодильники мясоперерабатывающих предприятий Россий-

ской Федерации относятся к энергоемким производствам. На выработку холода и эксплуатацию холодильных систем расходуется около половины потребляемой предприятиями электроэнергии, а в летний период она достигает 60 % от общего расхода.

Оптимальное управление конденсацией – важнейшая задача, решение которой позволяет стабилизировать работу холодильной машины в целом, снизить общее энергопотребление, увеличить срок службы электрооборудования и интервалы технического обслуживания. Управление конденсацией — это процесс регулирования температуры и давления в конденсаторе холодильной машины, который позволяет достичь максимальной эффективности работы и снизить энергопотребление. Давление конденсации напрямую зависит от системы охлаждения конденсатора, которая, в свою очередь, должна использоваться наиболее эффективно.

Материалы и методы. Одним из основных элементов холодильной машины является конденсатор, выполняемый, как правило, в виде пластинчатого теплообменного аппарата [3], посредством которого происходит отвод тепла от горячего пара хладагента и его конденсация. При этом сначала происходит охлаждение горячего газообразного хладагента до температуры конденсации, далее следует сама конденсация и, наконец, происходит охлаждение полученной жидкости [4].

Для корректной работы холодильной машины очень важно, чтобы хладагент полностью переходил в газообразное состояние в испарителе и полностью конденсировался в конденсаторе. В противном случае происходит заливание компрессора машины и, как следствие, выход его электродвигателя из строя.

Переохлаждением называют разность между температурой конденсации жидкости при данном давлении и температурой жидкости при этом

же давлении. Величина переохлаждения, которая должна находиться в пределах 4–7 К, может быть отрегулирована путем изменения интенсивности обдува конденсатора наружным воздухом. Обдув, как правило, производится посредством вентиляторов, производительность которых подбирается из учета производительности теплообменного аппарата. Принцип работы конденсатора холодильной машины показан на рисунке 1. Для наглядности процесс рассмотрен для фреона R22.

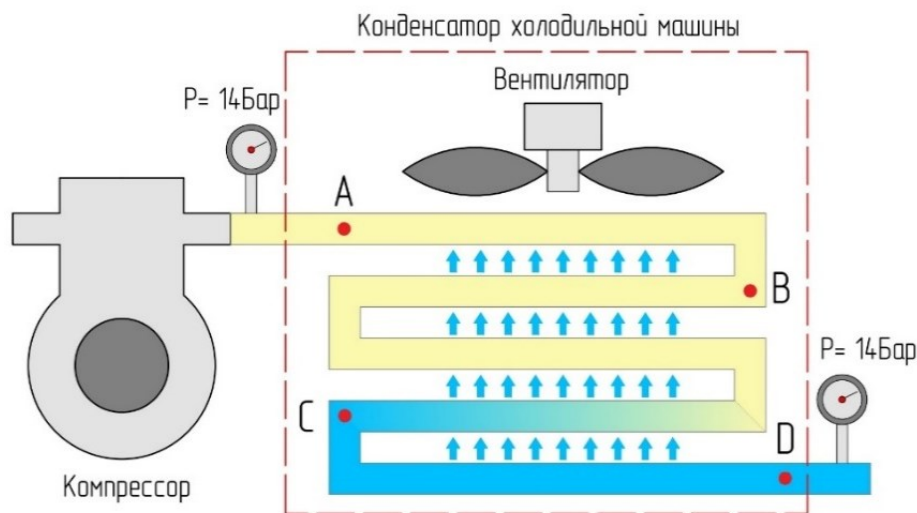


Рис. 1. Структурная схема конденсатора холодильной машины

В точке А пары с температурой $t = 70^\circ\text{C}$ попадают в конденсатор под давлением $P = 14$ Бар. На участке А-В перегрев паров снижается при том же уровне давления $P = 14$ Бар. В точке В начинается процесс конденсации, продолжающийся до точки С, в которой пары полностью конденсируются, и остается только жидкость с

температурой $t = 38^\circ\text{C}$ и давлением $P = 14$ Бар [5].

Воздух, проходящий через теплообменник конденсатора с начальной температурой t_{ae} нагревается до температуры t_{as} . Детальный график процесса теплопереноса представлен на рисунке 2.

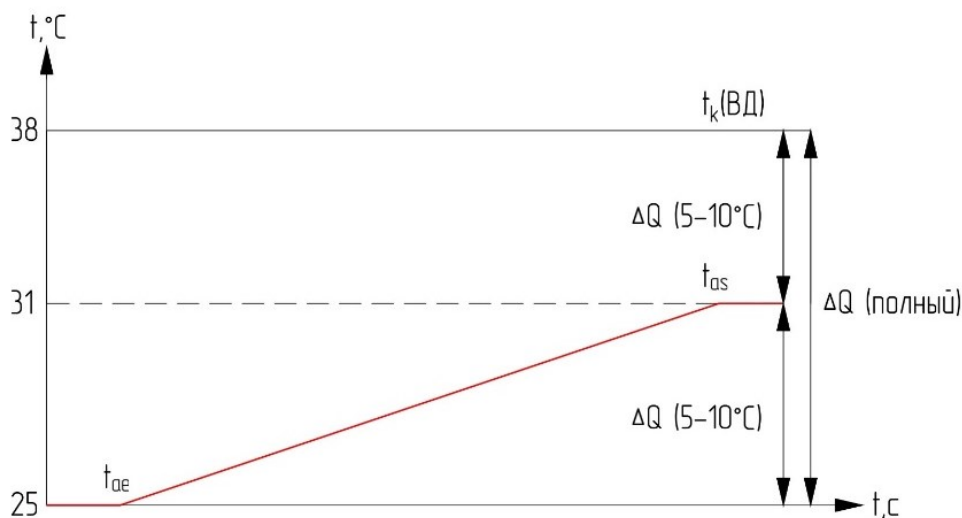


Рис. 2. Изменение температуры воздуха при охлаждении конденсатора
 t_k — показания температуры конденсации;
 $\Delta\theta$ — разность температур

Перепад температуры в конденсаторе с воздушным охлаждением рассчитывается согласно формуле:

$$\Delta\theta = t_{as} - t_{ae}. \quad (1)$$

Снижение интенсивности теплообмена конденсатора может привести к уменьшению охлаждения паров хладагента, в результате чего давление повышается до аномально высокого значения. В случае роста давления конденсации электродвигатель компрессора начинает потреблять больше электроэнергии, поскольку должен передать рабочему органу больше мощности. При повышенном давлении нагнетания хладагент может повредить компрессор, испаритель и другие компоненты холодильной системы. Это может привести к утечке хладагента, перегреву компрессора и другим проблемам. Давление на всасывающей магистрали также снижается, что приводит к ухудшению охлаждения электродвигателя компрессора. Таким образом, двигатель потребляет больший ток при ухудшении условий для охлаждения обмоток, что приводит к срабатыванию системы защиты и блокированию компрессора системой управления.

Конденсатор холодильной машины имеет, как правило 2 и более вентилятора. Использование нескольких вентиляторов позволяет производить их запуск по мере необходимости согласно дискретным уровням давления нагнетания в зависимости от внешних условий, таких как температура окружающей среды, уровень загрязненности теплообменника конденсатора.

При работе холодильной машины вентилятор конденсатора может работать непрерывно или периодически включаться и выключаться в зависимости от режима работы машины. Также он может иметь различные настройки скорости вращения крыльчатки для обеспечения оптимального потока воздуха и охлаждения конденсатора.

При этом вентиляторы запускаются посредством механических реле давления, настроенных на различные уровни давления с шагом в 2–4 Бар, или с помощью релейных выходов контроллера системы управления. Ввиду дискретности запуска вентиляторы вращаются с постоянной частотой вращения без возможности плавного регулирования [6]. В результате этого могут происходить резкие перепады давления и повышаться уровень энергопотребления вентиляторов.

Системы управления вентиляторами конденсатора — это комплекс устройств, которые позволяют контролировать работу вентиляторов и обеспечивать оптимальные условия для работы конденсатора.

Одним из способов повышения энергоэффективности работы вентиляторов конденсаторов холодильной машины является модернизация системы управления с помощью внедрения преобразователей частоты (ПЧ), позволяющих производить плавное регулирование частоты вращения сразу всех вентиляторов, при этом должна обеспечиваться такая же эффективность теплообмена, как и в случае с дискретной работой вентиляторов на максимальной частоте вращения [7]. Применение преобразователей частоты сопряжено со значительным повышением стоимости системы управления.

Для определения целесообразности использования ПЧ необходимо произвести оценку скоростей вращения вентиляторов при работе от ПЧ при той же эффективности охлаждения, какую обеспечивают 1, 2 и 3 дискретно запущенных вентилятора при работе на максимальной частоте вращения. При этом в качестве показателя для оценки эквивалентности процесса охлаждения использована температура хладагента на выходе из конденсатора.

Основная часть. Исследование произведено с помощью среды компьютерного моделирования SolidWorks и модуля SolidWorks Flow Simulation. Данное программное обеспечение позволяет производить моделирование потока жидкости и газа и вычисления параметров разрабатываемого изделия [8]. Одним из преимуществ SolidWorks Flow Simulation является его интеграция с SolidWorks CAD, что позволяет легко импортировать CAD-модели в программу и создавать сложные трехмерные модели для анализа.

Для создания модели жидкой среды необходимо определить ее свойства, такие как плотность, вязкость, температура и т. д. Затем можно использовать инструменты SolidWorks для создания сетки, которая будет представлять поток жидкости. После этого можно использовать различные инструменты для анализа потока жидкости, такие как анализ скорости потока, анализ давления и т. д. С помощью программного пакета SolidWorks Flow Simulation произведено моделирование течения хладагента через пластинчатый теплообменник конденсатора холодильной машины с 3 вентиляторами.

Задача моделирования состоит в том, чтобы построить геометрическую модель пластинчатого теплообменника и произвести исследование процесса охлаждения при дискретном запуске одного вентилятора на максимальной частоте вращения в сравнение с запуском всех трех вентиляторов с некой скоростью X при одинаковой эффективности охлаждения.

Принятые условия однозначности при проведении моделирования [9]:

- однозначно определена геометрия исследуемого объекта. Построена 3D-модель теплообменника конденсатора;
- заданы параметры жидкости: ее тип, условия течения;
- сформированы граничные условия.
- Процесс моделирования работы произв. изводился одним подходом:
- заданный тип задачи: внешняя задача (но с условием наличия подобласти течения) [10];
- подключённые физические модели:
- течение жидкости/газа;
- теплопроводность;
- гравитация;
- вид текучей среды: воздух, хладагент;
- характеристика течения: ламинарное и турбулентное;

- термодинамические параметры окружающего воздуха: температура 20 °С, давление 101 Па.

При расчете используются математические модели теплопереноса Фурье и модель движения вязкой осреднённой по Ньютону жидкости Навье-Стокса [11]. Оно было предложено французским физиком Жозефом Луи Мари Навье (Joseph Louis Marie Navier) в 1822 году и немецким физиком Германом Людвигом Фердинандом Стокс (Hermann Ludwig Ferdinand Stokes) в 1845 году. Одним из основных применений уравнения Навье-Стокса является моделирование течения жидкости в каналах, трубах, каналах и других системах.

В декартовой системе координат систему уравнений Навье-Стокса можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (4)$$

где t – время; u – скорость среды; ρ – плотность среды; P – давление среды; S_i – внешние массовые силы; E – энергия единичной массы среды, Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме среды; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_k – дифференциальный тепловой поток.

Построение 3D-модели теплообменника произведено с помощью стандартных средств SolidWorks. При этом использован твердотельный способ моделирования сборки объектов, которым в дальнейшем был назначен необходимый материал, включая пластик, металл и композитные материалы. Пластик использовался для изготовления лопастей вентилятора, а металл – для каркаса и крепления. Трубки для врезки конденсатора в гидромагистраль выполнены из меди [12]. Внешний вид построенной геометрической модели представлен на рисунке 3.

Для оценки эффективности охлаждения необходимо использовать геометрические модели вентиляторов конденсаторов, используемых в промышленности. Были приняты 3 вентилятора Weiguang YWF4D-500-S-145/65-G с диаметром 500 мм, производительностью в 7964 м³/ч

и номинальной частотой вращения 1400 об/мин.

Начальными и граничными условиями модели являются:

- вещество – хладагент: R507A;
- материал трубки конденсатора – медь;
- материал пластин конденсатора – алюминий;
- материал корпуса – сталь;
- математическая модель турбулентности – стандартная к-ε модель [13].

Стандартная к-ε модель широко используется в различных областях, таких как аэродинамика, гидродинамика, теплопередача и другие. Она позволяет точно описывать турбулентный поток и может быть применена к различным задачам, связанным с турбулентностью.

Начальные параметры хладагента на входе в трубку конденсатора:

- температура 41 °С.

Определение эффективности конденсатора холодильной машины при работе одного центрального вентилятора с частотой вращения 1400 об/мин приведено на рисунках 4–8.

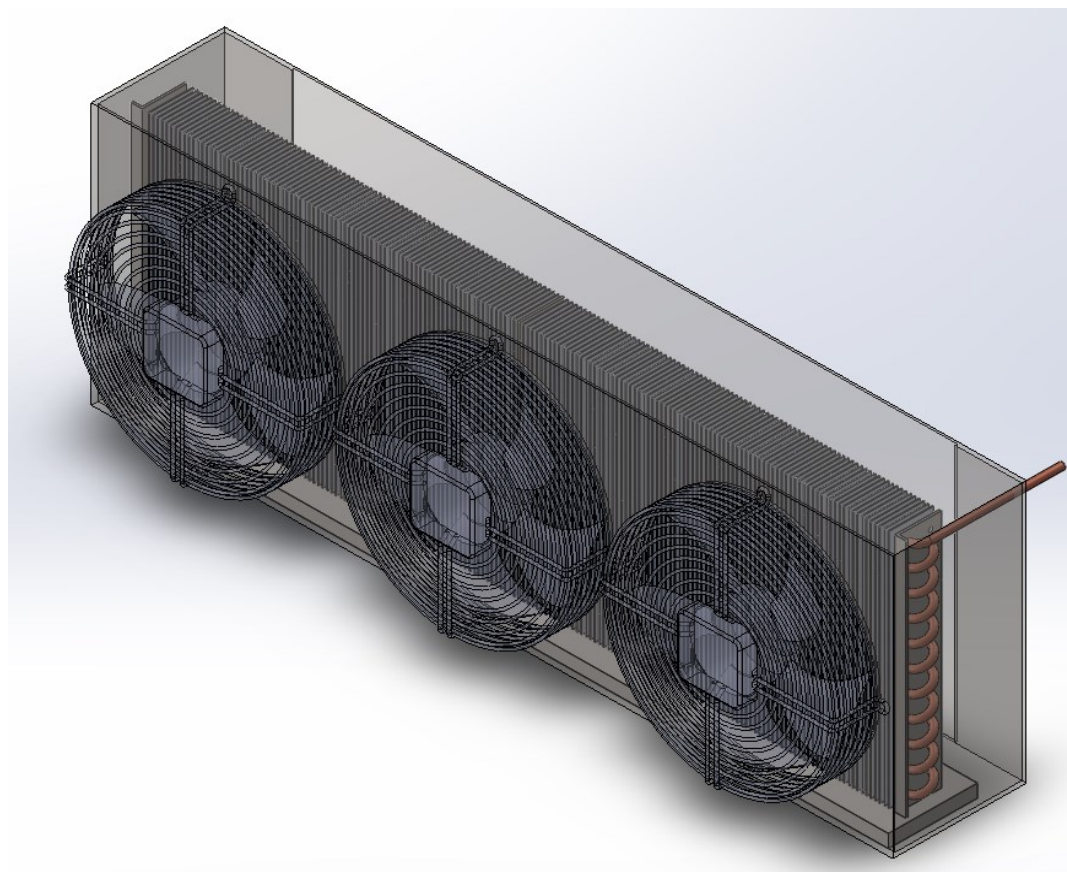


Рис. 3. Внешний вид спроектированной модели конденсатора холодильной машины

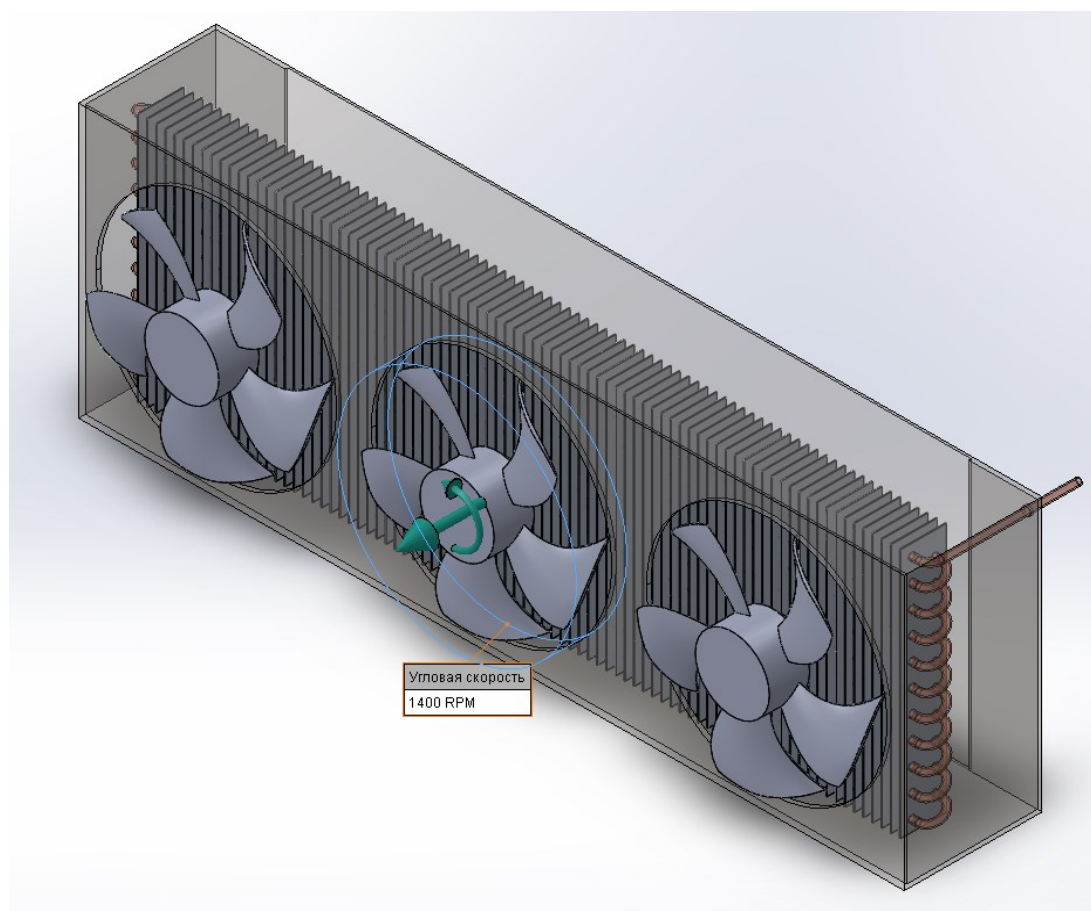
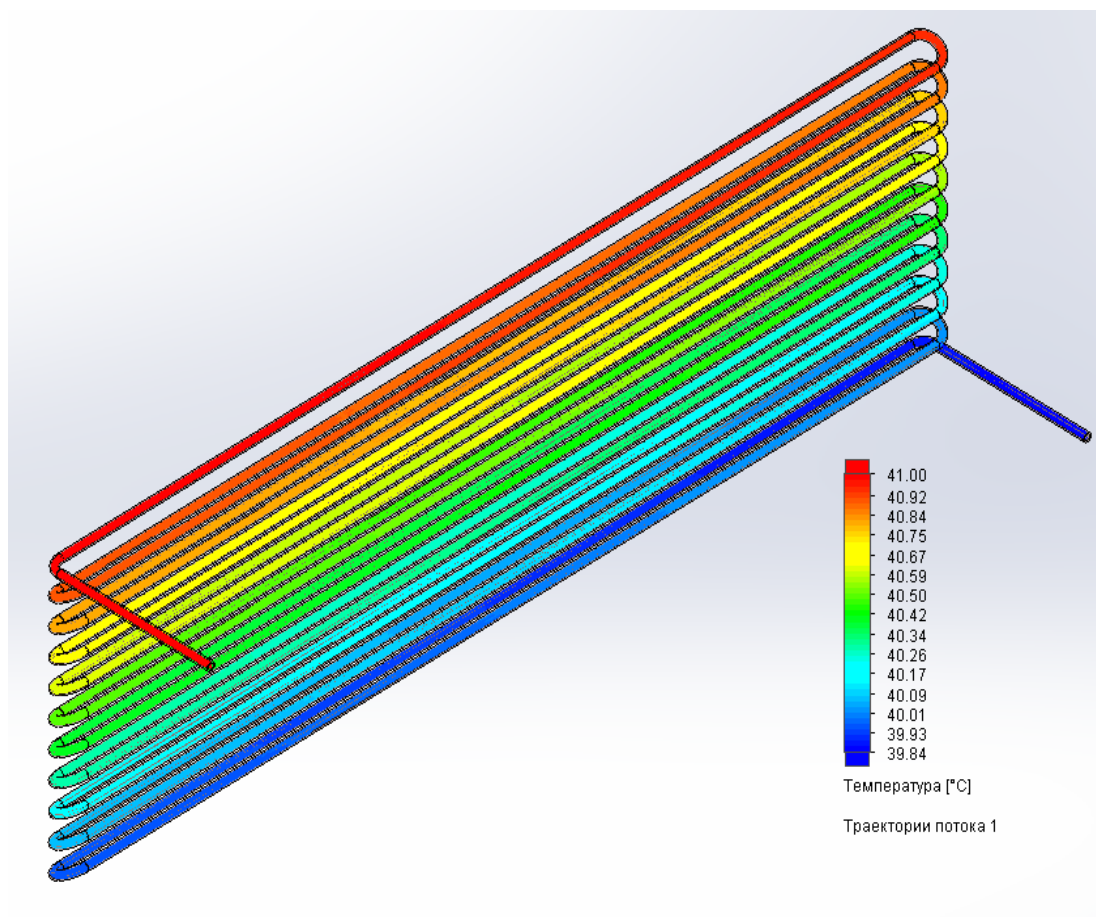
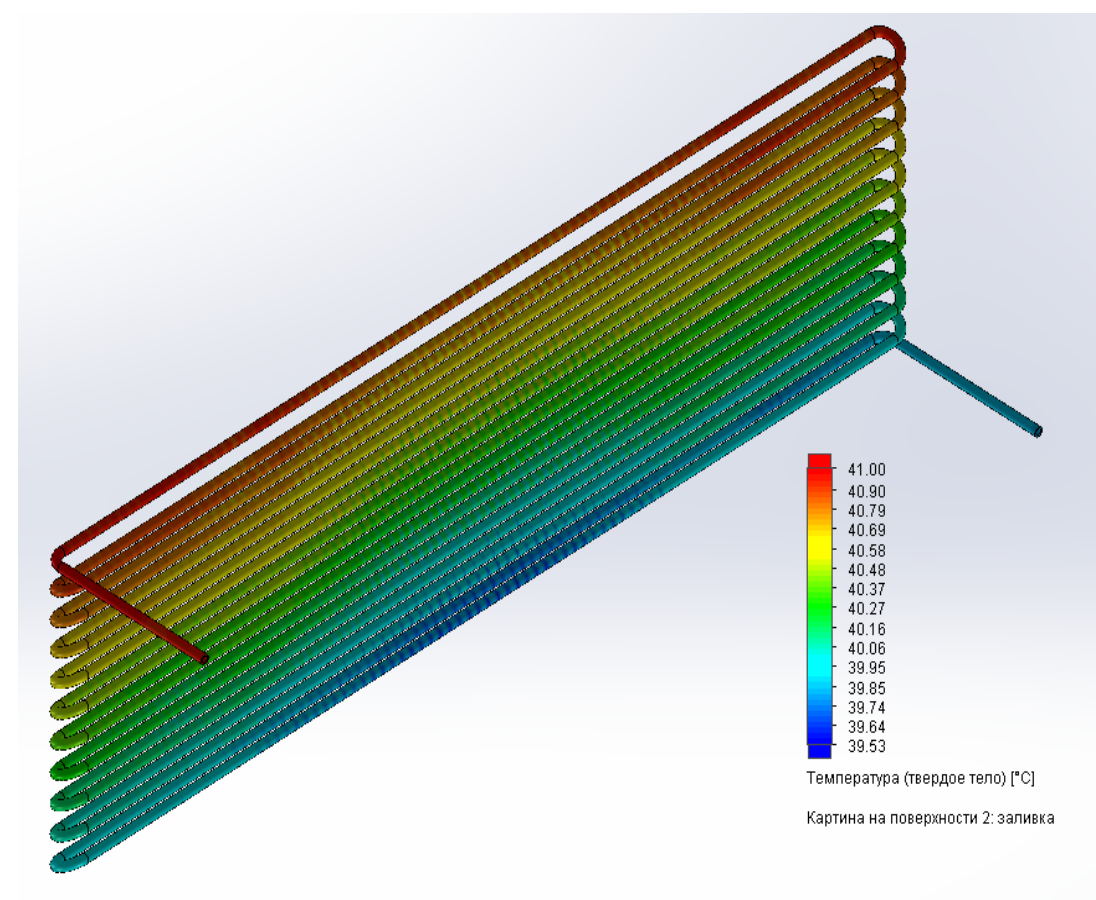
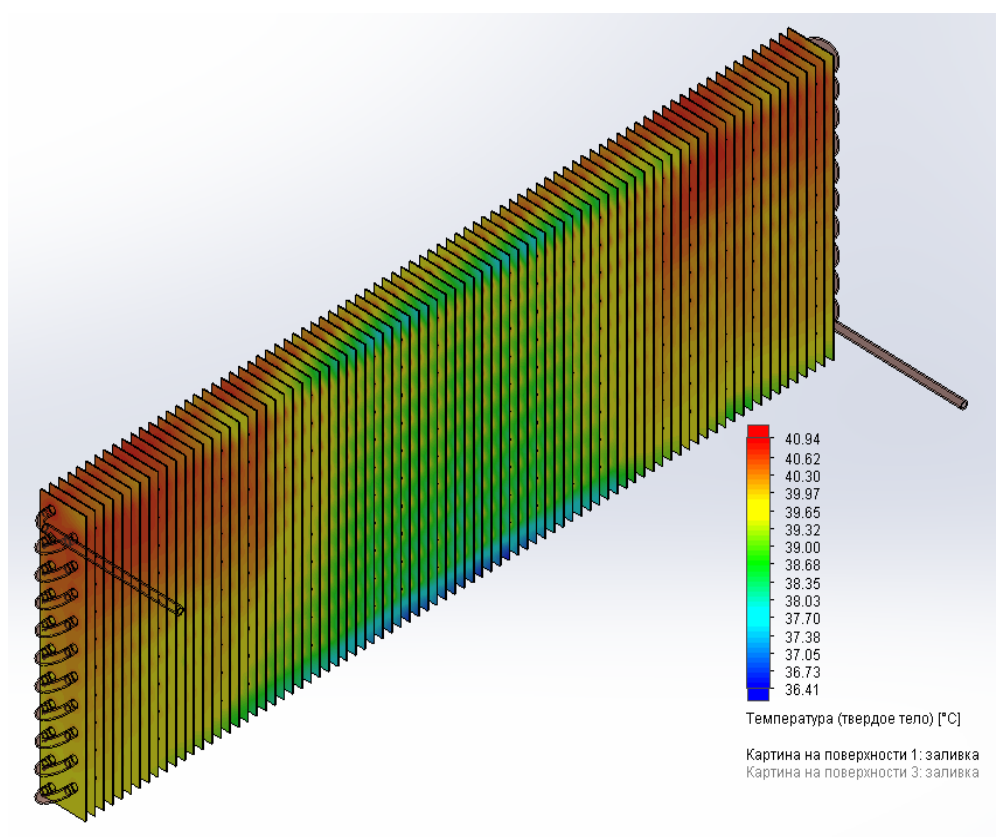
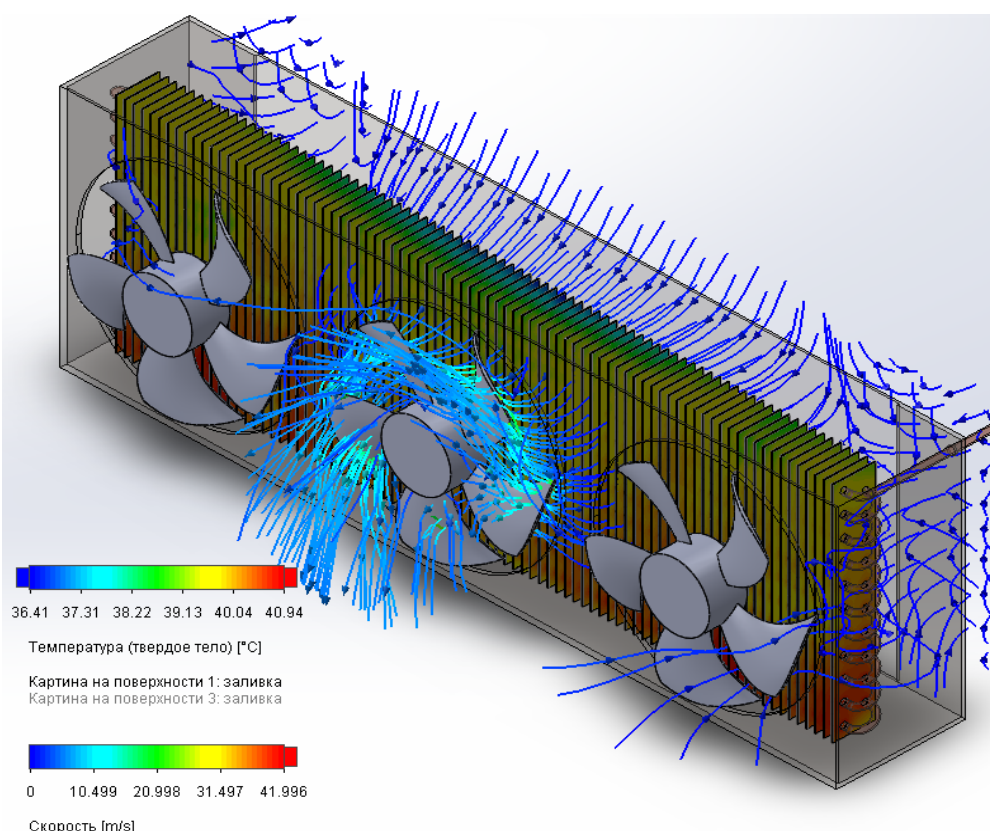


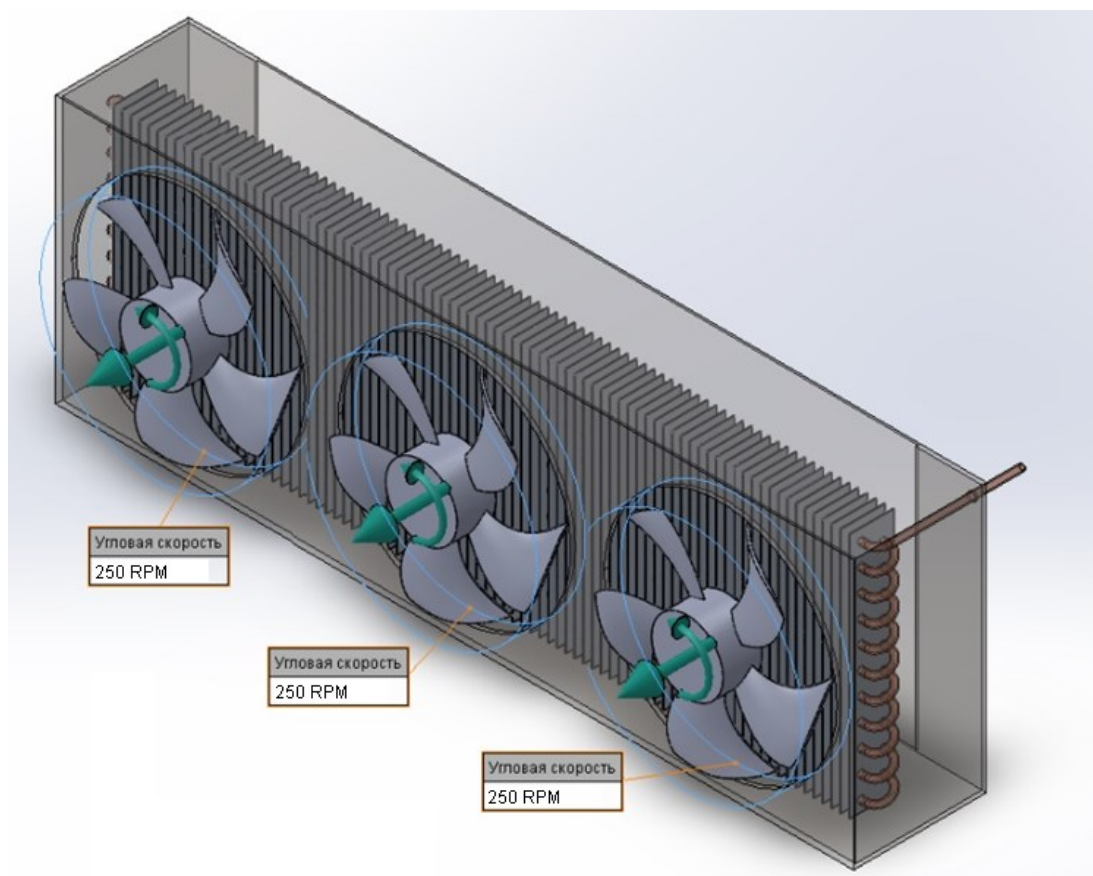
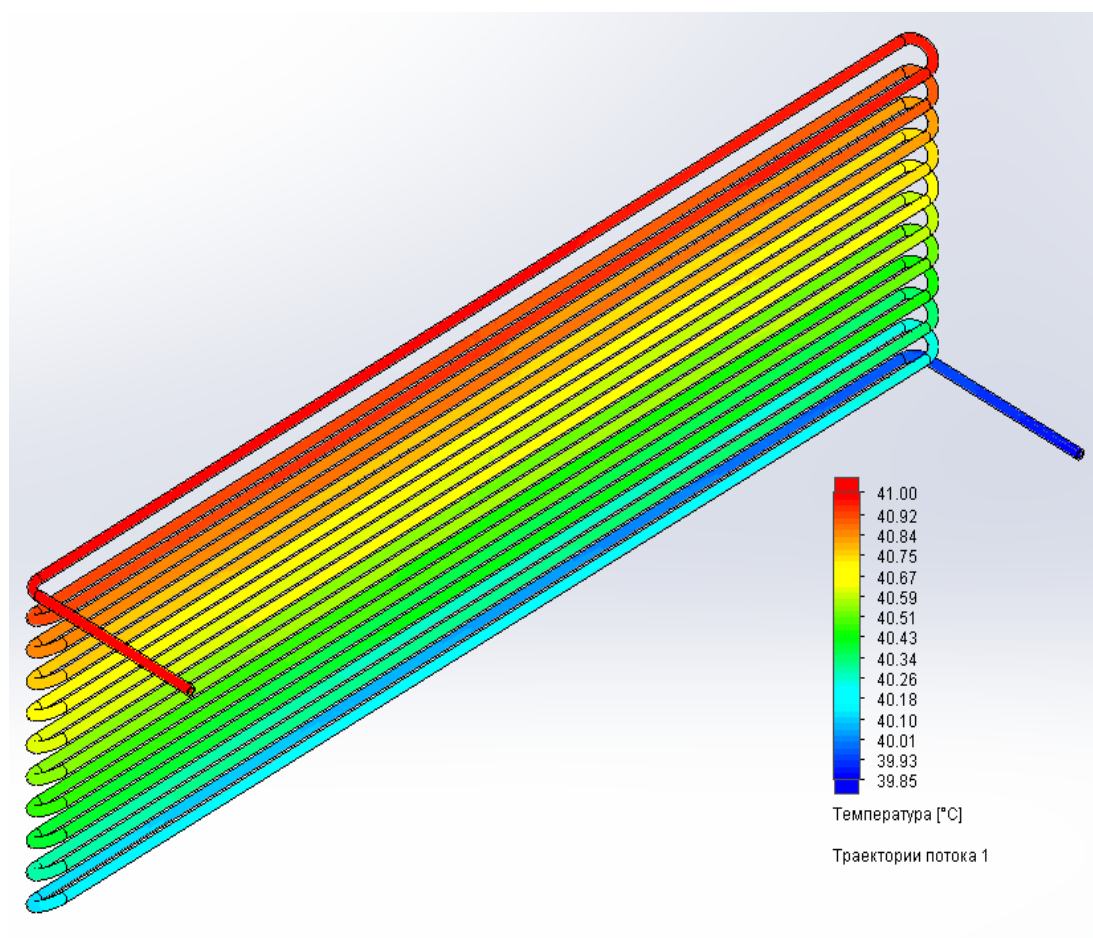
Рис. 4. Параметры работы вентиляторов (1×1400 об/мин)

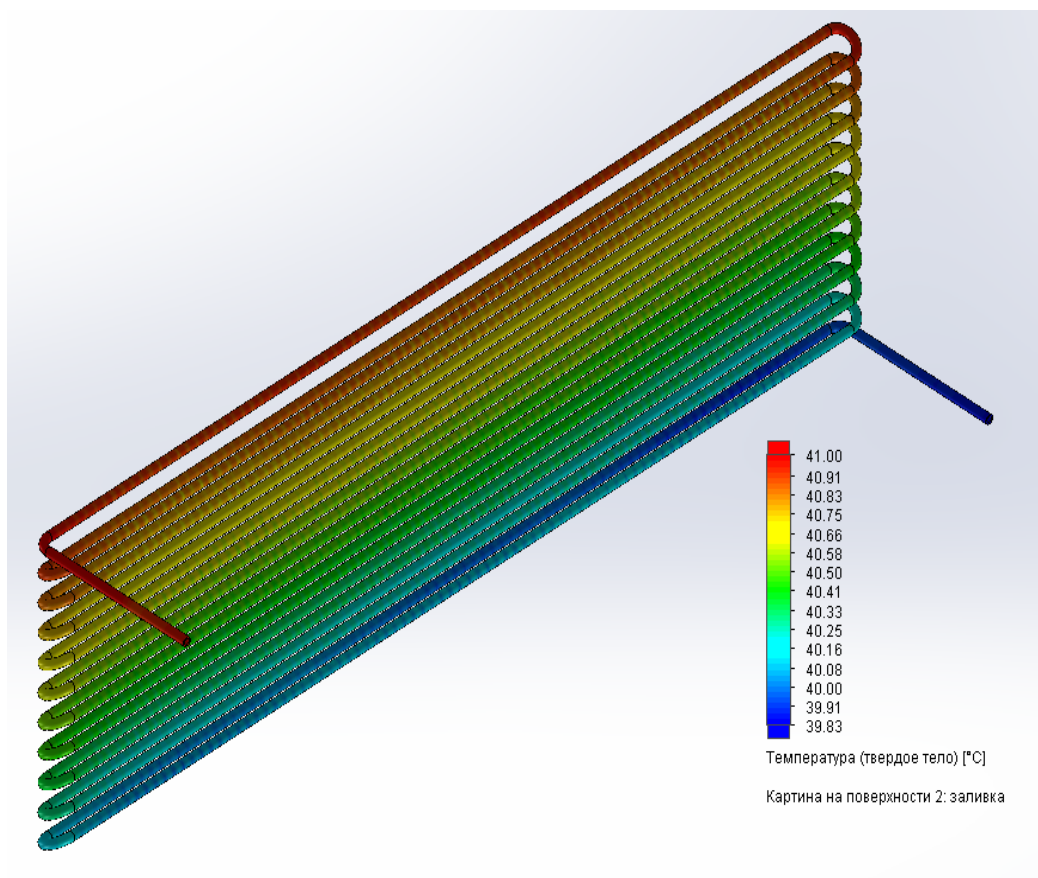
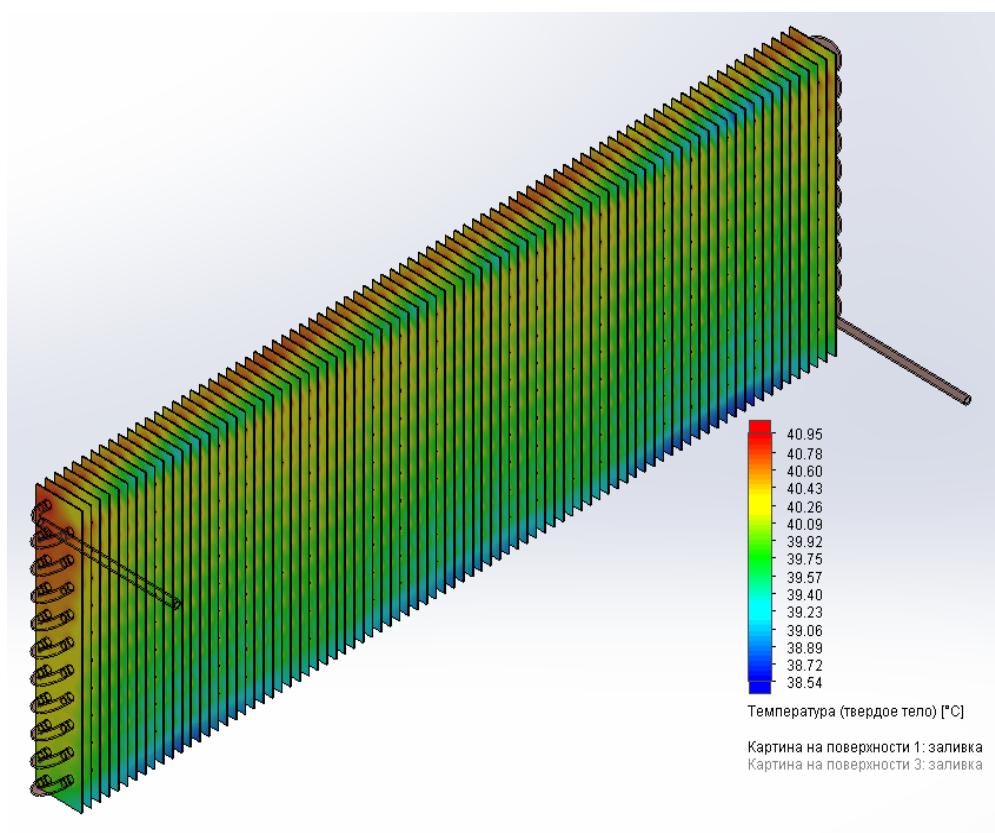
Рис. 5. Температура потока хладагента в трубке (1×1400 об/мин)Рис. 6. Температура на поверхности трубки (1×1400 об/мин)

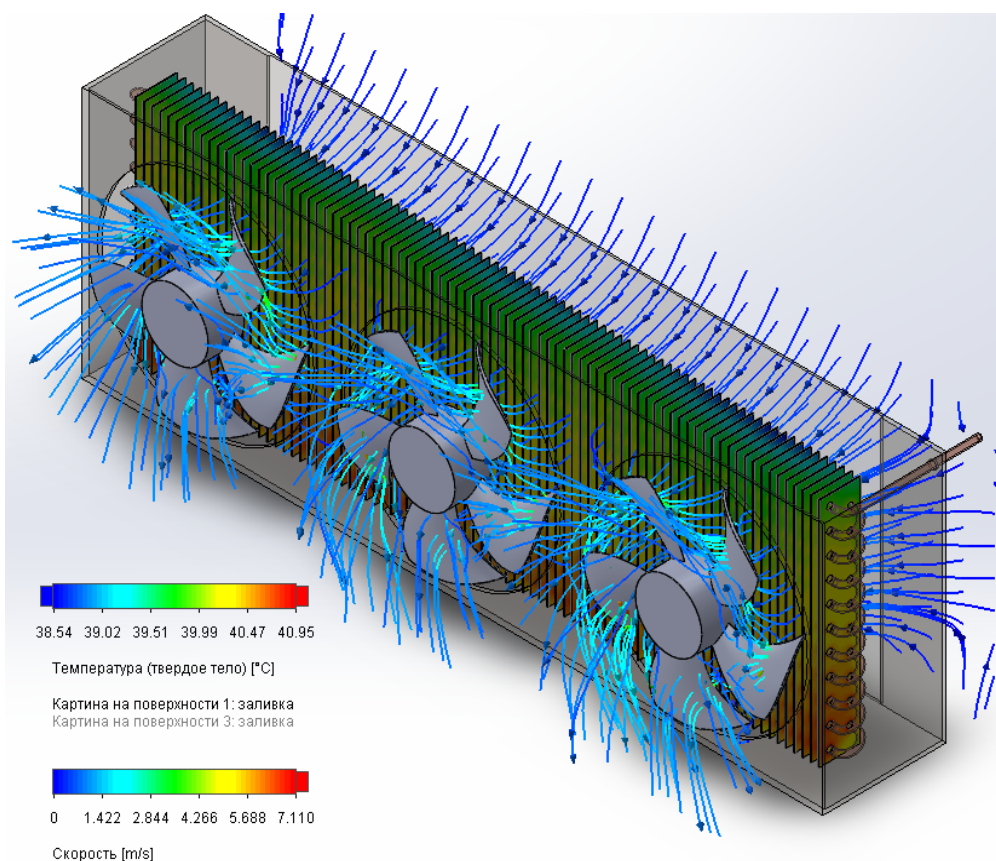
Рис. 7. Температура на поверхности пластин (1×1400 об/мин)Рис. 8. Распределение потоков воздуха при охлаждении (1×1400 об/мин)

Далее произведена симуляция, в ходе которой произведен расчет скорости вращения всех 3-х вентиляторов при обеспечении той же эффек-

тивности охлаждения [14], то есть при совпадении температуры хладагента на выходе из конденсатора. Результаты моделирования представлены на рисунках 9–13.

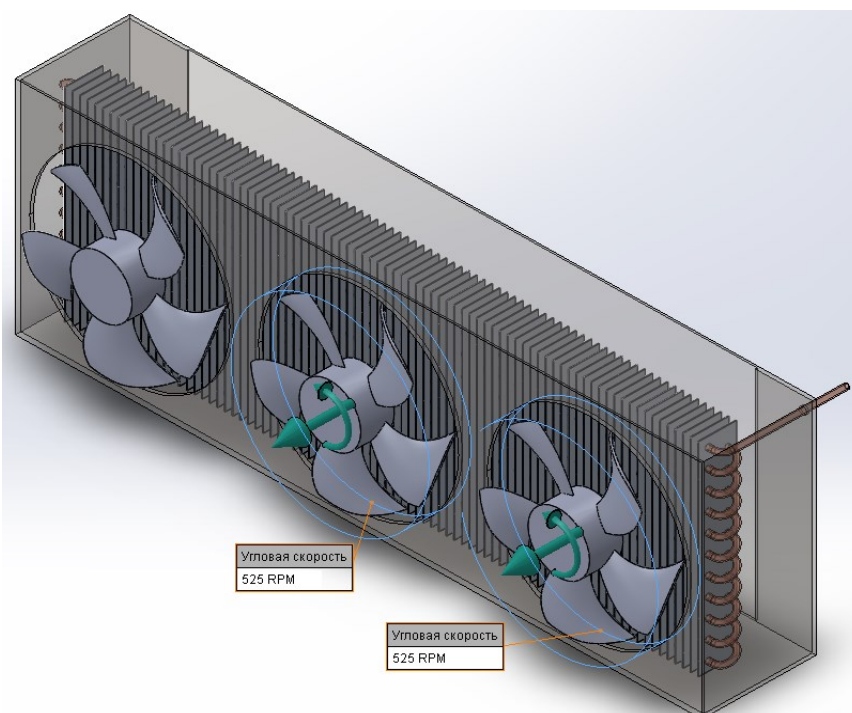
Рис. 9. Параметры работы вентиляторов (3×250 об/мин)Рис. 10. Температура потока хладагента в трубке (3×250 об/мин)

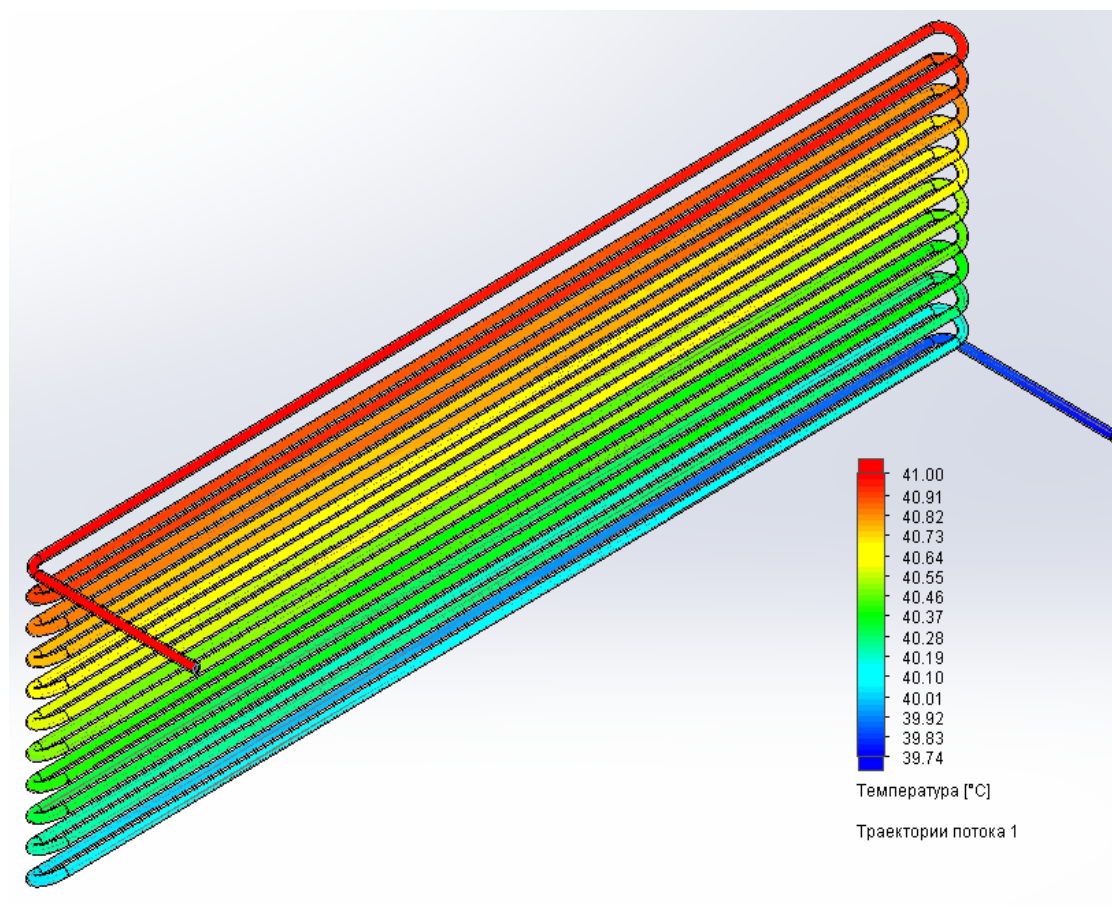
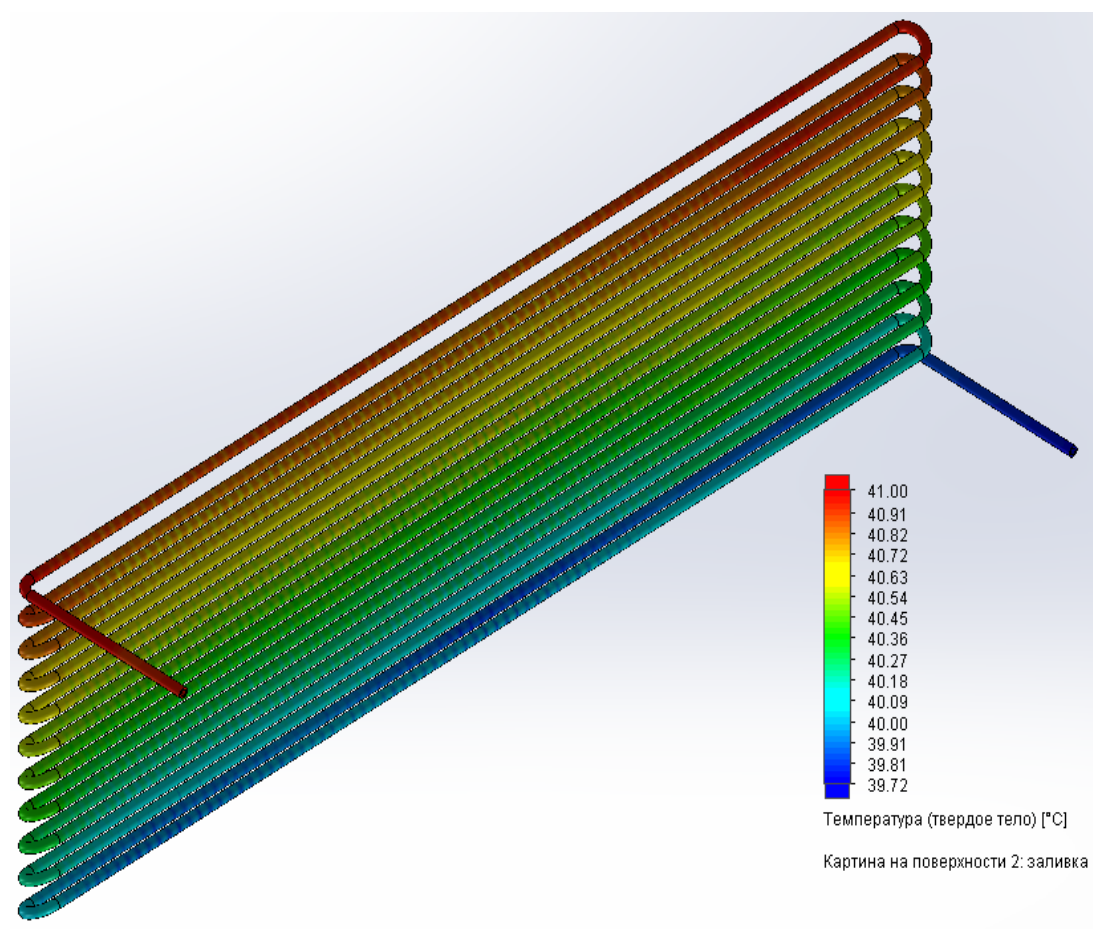
Рис. 11. Температура на поверхности трубки (3×250 об/мин)Рис. 12. Температура на поверхности пластин (3×250 об/мин)

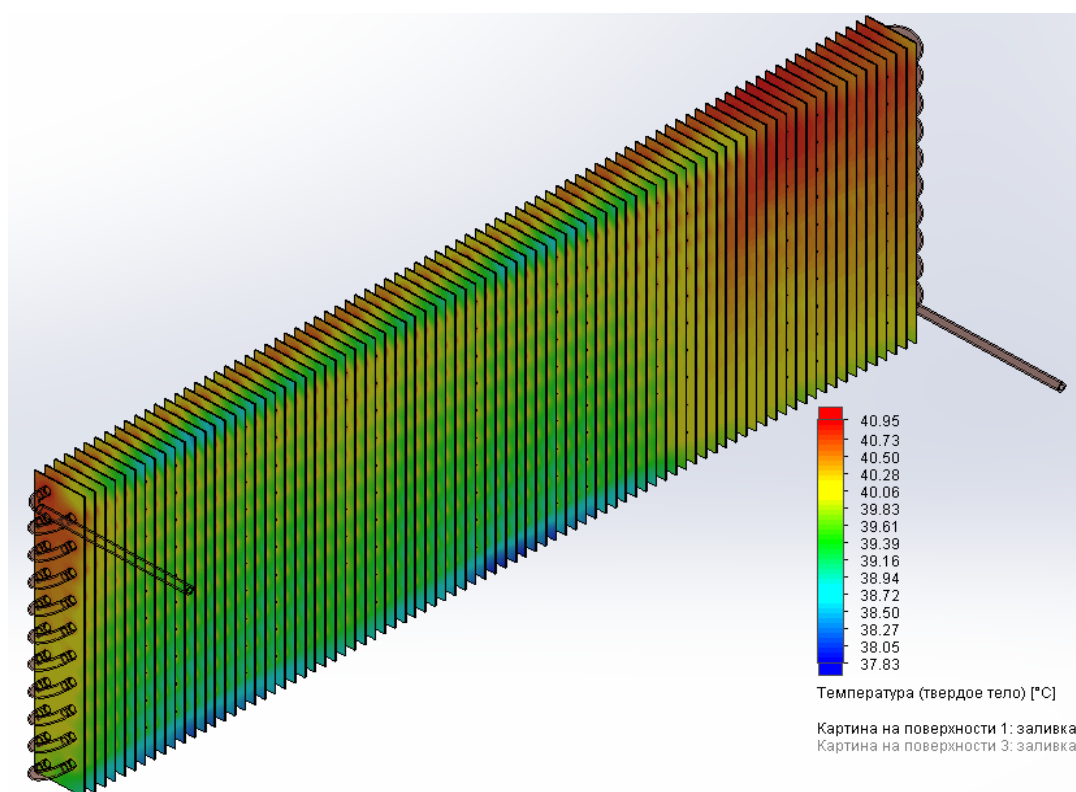
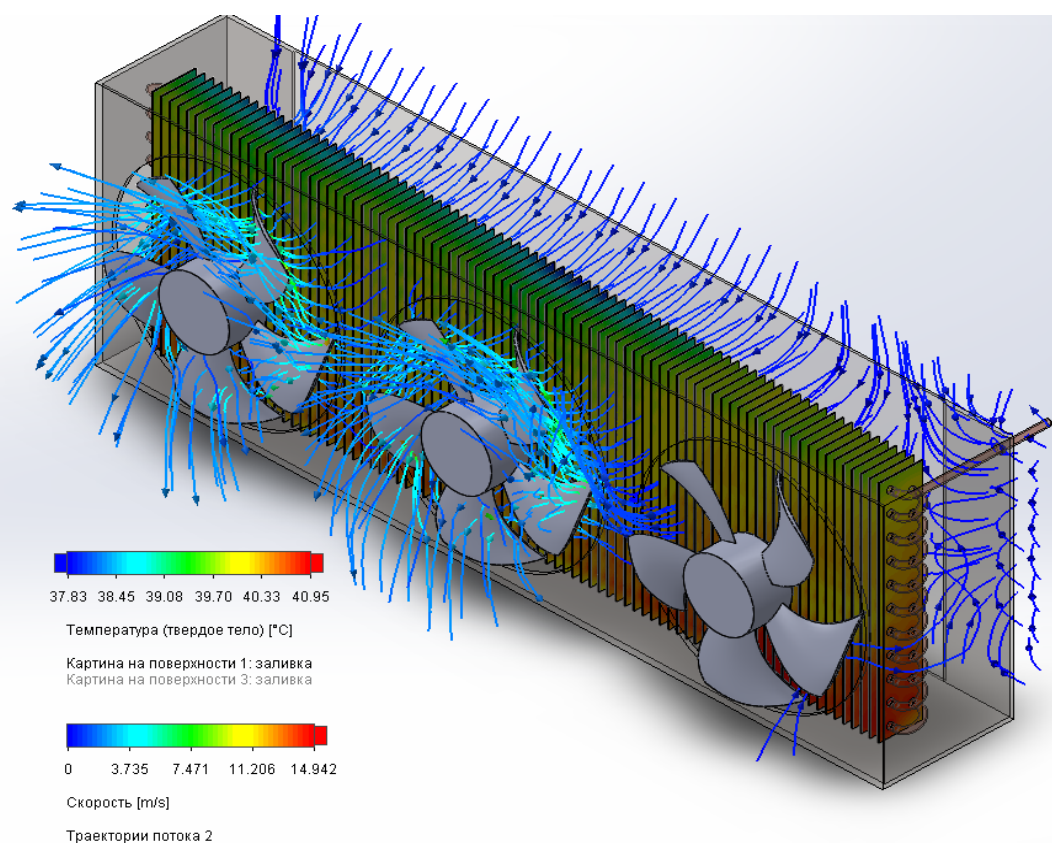
Рис. 13. Распределение потоков воздуха при охлаждении (3×250 об/мин)

В результате моделирования выявлено, что работа одного вентилятора с частотой 1400 об/мин эквивалентна работе трёх вентиляторов с частотой 250 об/мин. Так как при таких условиях температура хладагента на выходе составила $39,85^\circ\text{C}$.

Далее произведена симуляция, в ходе которой произведен расчет скорости вращения 2-х вентиляторов из группы при обеспечении той же эффективности охлаждения, то есть при совпадении температуры хладагента на выходе из конденсатора. Результаты моделирования представлены на рисунках 14–18.

Рис. 14. Параметры работы вентиляторов (2×525 об/мин)

Рис. 15. Температура потока хладагента в трубке (2×525 об/мин)Рис. 16. Температура на поверхности трубки (2×525 об/мин)

Рис. 17. Температура на поверхности пластин (2×525 об/мин)Рис. 18. Распределение потоков воздуха при охлаждении (2×525 об/мин)

В результате моделирования выявлено, что работа двух вентиляторов с частотой 525 об/мин эквивалентна работе одного вентиляторов с частотой 1400 об/мин. Так как при таких условиях

температура хладагента на выходе составила $39,85^\circ\text{C}$. Графическая зависимость температуры хладагента от частоты вращения вентиляторов для данного случая приведена на рисунке 19.

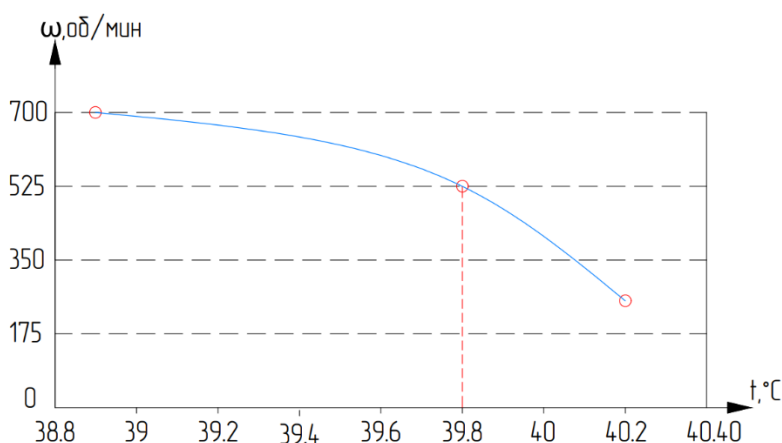


Рис. 19. Графическая зависимость температуры хладагента от частоты вращения вентиляторов

Полученные данные могут быть использованы для определения энергоэффективности использования преобразователей частоты в системе управления вентиляторами конденсатора [15]. Для этого будет вычислена частота напряжения питающей сети вентилятора, при которой частота вращения крыльчатки совпадет с частотой, вычисленной в рамках данного исследования [16]. На основании данных о частоте напряжения питающей сети в математической имитационной модели преобразователя частоты будут вычислены значения потребляемой из сети электрической мощности при данных условиях.

Выводы.

1. Рассмотренный метод исследования потоков жидкости в среде SolidWorks Flow Simulation позволил произвести исследование процесса охлаждения пластинчатого теплообменника с протекающих по нему хладагентом.

2. Экспериментально установлены скорости вращения одновременного вращающихся вентиляторов конденсатора холодильной машины в сравнении с дискретно запущенными вентиляторами на максимальной частоте вращения.

3. Построена графическая зависимость температуры хладагента на выходе из конденсатора холодильной машины от частоты вращения 2-х вентиляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Роль холода в мировой экономике. 38-я Информационная записка МИХ по холодильным технологиям (июнь 2019 г.) // Холодильная техника. 2020. Т. 109. № 5. С. 6–13. <https://doi.org/10.17816/RF104029>
2. Оценка энергоэффективности холодильных установок и систем // Холодильная техника. 2013. № 10. С. 22–29.
3. Кушев Л.А., Саввин Н.Ю. Тепловизионные исследования оригинальной пластины теплообменника // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.

2021. № 1. С. 38–45. DOI 10.34031/2071–7318-2021-6-1-38–45.

4. Азизов. Д., Сайдиев Ф. Основы холодильной техники и технического обслуживания холодильных систем. Ташкент: Baktria press, 2017. 176 с.

5. Конденсаторы воздушного охлаждения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xiron.ru/content/view/31686/28/> (дата обращения: 20.08.2023).

6. Иващенко Е.Ю., Зверок А.С. Холодильные машины: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1–36 20 01 «Низкотемпературная техника». Минск: БНТУ, 2020 г. 82 с.

7. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». Иваново, 2018. 184 с.

8. Лунева С.К. Моделирование процессов теплопереноса в программной среде SolidWorks/FlowSimulation // ТТПС. 2018. №2 (44). С. 27–31.

9. Обобщенный закон Ньютона [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/8375555/page:7/> (дата обращения: 20.08.2023).

10. Попов А.Ю. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе solidworks flow simulation // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №3–3. С. 74–77.

11. Соловьев А.Н., Глазунова Л.В. Моделирование процесса охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в SOLIDWORKS // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10, № 4(47). С. 466–473.

12. Зиновьев Д.В. Основы проектирования в SOLIDWORKS 2016. ДМК-Пресс, 2017. 277 с.

13. Коркодинов Я. А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15, № 2. С. 5–16.

14. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3(21). С. 231–234.

15. Применение преобразователей частоты для управления вентиляторами конденсаторов и градирен [Электронный ресурс]. URL: <https://drives.ru/standartnye-resheniya/ventilyatory-kondensatorov-i-gradiren/?ysclid=llpels2syi112043113> (дата обращения: 20.08.2023).

16. Кореньков Е.В. Применение частотного регулирования в системах вентиляции для повышения энергоэффективности // Вестник магистратуры. 2022. №2–2 (125). С. 32–34.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: n-savvin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гарбузов Дмитрий Денисович, магистрант кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: BSTU-Belgorod@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 04.09.2023 г.

© Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д., 2023

***Savvin N.Y., Garbuzov D.D.**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhova

**E-mail: n-savvin@mail.ru*

INVESTIGATION OF THE COOLING EFFICIENCY OF THE PLATE HEAT EXCHANGER OF THE CONDENSER OF AN INDUSTRIAL REFRIGERATION MACHINE AT DIFFERENT FAN SPEEDS

Abstract. A modern method of studying fluid flows through computer modeling in the SolidWorks Flow Simulation environment is considered. The model of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine acts as the object under study. The article compares the efficiency of heat transfer during the operation of fans at different speeds of the impeller. An overview of using SolidWorks Flow Simulation for process modeling cooling of the plate heat exchanger is provided. The use of infinitely variable speed control of each of the condenser fans provides the same cooling efficiency as when starting a smaller number of fans at the rated speed, but in the first case, greater energy efficiency can be achieved. Studies have been carried out, the results of which have obtained the values of the fan speeds of the plate heat exchanger of the condenser of the refrigeration machine under various fan configurations. These values are necessary for further computer simulation of the fan control system based on the frequency converter and to identify patterns between a decrease in the speed of fan motors and a decrease in their power consumption. SolidWorks Flow Simulation has been found to be a powerful tool for simulating low-velocity flows, enabling parallel design and radically changing fluid flow and heat transfer analysis.

Keywords: plate heat exchanger, condenser, refrigeration machine, parametric flow modeling, SolidWorks, fluid dynamics calculations.

REFERENCES

1. The role of cold in the global economy. 38th IIR Information Note on Refrigeration technologies (June 2019) [Rol' holoda v mirovoj ekonomike. 38-ya Informacionnaya zapiska MIH po holodil'nyim tekhnologiyam (iyun' 2019 g.)]. Refrigeration technology. 2020. No. 5. Pp. 6–13. <https://doi.org/10.17816/RF104029>

2. Evaluation of the energy efficiency of refrigeration units and systems [Ocenka energoeffektivnosti holodil'nyh ustanovok i sistem]. Refrigeration technology. 2013. No. 10. Pp. 22–29.

3. Kushchev L.A., Savvin N.Yu. Thermal imaging studies of the original plate of the heat exchanger [Teplovizionnye issledovaniya original'noj plastiny teploobmennika]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 1. Pp. 38–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45.

4. Azizov D., Saidiev F. Fundamentals of refrigeration technology and maintenance of refrigeration systems [Osnovy holodil'noj tekhniki i tekhnicheskogo obsluzhivaniya holodil'nyh sistem]. Tashkent: Baktria press, 2017. 176 p.
5. Air cooling condensers [Kondensatory vozdushnogo ohlazhdeniya]. URL: <https://www.xiron.ru/content/view/31686/28/> (date of application: 08.20.2023).
6. Ivashchenko E.Yu., Zverok A.S. Refrigerating machines: an educational and methodical manual for students of the specialty 1-36 20 01 «Low-temperature equipment» [Holodil'nye mashiny: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov special'nosti 1-36 20 01 «Nizkotemperaturnaya tekhnika»]. Minsk: BNTU, 2020. 82 p.
7. Vinogradov A.B., Korotkov A.A. Control algorithms of a high-voltage multilevel frequency converter [Algoritmy upravleniya vysokovol'tnym mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty.]. Ivanovo State Power Engineering V. I. Lenin University". Ivanovo, 2018. 184 p.
8. Luneva S.K. Modeling of heat and mass transfer processes in the SolidWorks software environment/FlowSimulation [Modelirovanie processov teplomassoperenosa v programmnoj srede SolidWorks/FlowSimulation]. TTPS. 2018. No.2 (44). Pp. 27–31.
9. Generalized Newton's law [Obobshchennyj zakon n'yutona]. URL: <https://studfile.net/preview/8375555/page:7/> (date of application: 08.20.2023).
10. Popov A.Yu. Modeling of airflow distribution in the solidworks flow simulation software package [Modelirovanie raspredeleniya vozdushnogo potoka v programmnom komplekse solidworks flow simulation]. Actual problems of humanities and natural sciences. 2017. No.3-3. Pp. 74–77.
11. Soloviev A.N., Glazunova L.V. Modeling of the cooling process of electronic equipment elements in SOLIDWORKS [Modelirovanie processa ohlazhdeniya elementov radioelektronnoj apparatury v SOLIDWORKS]. Bulletin of the Don State Technical University. 2010. Vol. 10, No. 4(47). Pp. 466–473.
12. Zinoviev D.V. Fundamentals of design in SOLIDWORKS 2016 [Osnovy proektirovaniya v SOLIDWORKS 2016]. DMK-Press, 2017. 277 p.
13. Korkodinov Ya.A. Review of a family of k-ε models for turbulence modeling [Obzor semeystva k-ε modelej dlya modelirovaniya turbulentnosti]. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. 2013. Vol. 15, No. 2. Pp. 5–16.
14. Kornienko F.V. Increasing the efficiency of the evaporative condenser of compression refrigerating machines [Uvelichenie effektivnosti isparitel'nogo kondensatora kompressionnyh holodil'nyh mashin]. Engineering Bulletin of the Don. 2012. No. 3(21). Pp. 231–234.
15. Application of frequency converters to control fans of capacitors and cooling towers [Primenenie preobrazovatelej chastoty dlya upravleniya ventilyatorami kondensatorov i gradiren]. URL: <https://drives.ru/standartnye-resheniya/ventilyatory-kondensatorov-i-gradiren/?ysclid=llpels2syi112043113> (date of application: 08.20.2023).
16. Korenkov E.V. Application of frequency control in ventilation systems to improve energy efficiency [Primenenie chastotnogo regulirovaniya v sistemah ventilyacii dlya povysheniya energoeffektivnosti]. Bulletin of the Magistracy. 2022. No.2-2 (125). Pp. 32–34.

Information about the authors

Savvin, Nikita Yu. PhD, Assistant professor. E-mail: n-savvin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Garbuzov, Dmitriy D. Master student. E-mail: BSTU-Belgorod@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 04.09.2023

Для цитирования:

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56

For citation:

Savvin N.Y., Garbuzov D.D. Investigation of the cooling efficiency of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine at different fan speeds. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-57-67

Березкин С.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: berezkin.s.official@gmail.com

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ АСТРАХАНИ В ПОСЛЕДНЕЙ ЧЕТВЕРТИ XVIII ВЕКА

Аннотация. Градостроительная история Астрахани продолжает оставаться одной из актуальных тем исследований, как в общероссийском контексте, так на местном уровне для понимания этапов формирования городской структуры. В рамках данной статьи представлены уточнения о планировочном развитии Астрахани в последней четверти XVIII века. На основе архивных данных выявлены предложения губернатора П.Н. Кречетникова и первоначальный проект 1775 года, созданный под руководством архитектора Я.И. Шнейдера. После корректировки Комиссией о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы этот план был последним Высочайше утвержденным в XVIII веке. Дополнена информация о концепции П.С. Потемкина по зонированию территории с градацией зданий по этажности и строительным материалам. Не смотря на значимую роль административных руководителей, важнейший вклад в создание парадного облика центральной части города из ансамблей административных, общественных и жилых зданий внес архитектор А.П. Дигби. Его план 1798 года был утвержден гражданским губернатором И.С. Захаровым, а в 1801 году подтвержден императором Александром I. В результате государственного регулирования и поддержки частного строительства удалось объединить все части города в единую систему и сформировать регулярную планировочную структуру. Проанализированы и введены в научный оборот ранее не публиковавшиеся графические материалы из фондов Российского государственного исторического архива.

Ключевые слова: генеральный план Астрахани, регулярная планировка, квартальная застройка, астраханский губернатор П.Н. Кречетников, архитектор Я.И. Шнейдер, кавказский генерал-губернатор П.С. Потемкин, архитектор А.П. Дигби.

Введение. Изучение градостроительного развития российских городов продолжает оставаться актуальным направлением исследований, поскольку объясняет генезис развития планировочной структуры и показывает ретроспективу грандиозных замыслов и их реализации. Наиболее важным периодом для большинства исторических городов стал XVIII век. Масштабные мероприятия по реконструкции хаотичной застройки в регулярные кварталы способствовали решению жизненно важных проблем (пожарной безопасности, благоустройства, партикулярного строительства и т.д.) и дальнейшему развитию. Градостроительным реформам Екатерины II во второй половине XVIII века посвящены фундаментальные труды В.А. Шкварикова [1], В.А. Лаврова [2], Т.Ф. Саваренской, Д.О. Швидковского, Ф.А. Петрова [3], Н.Ф. Гуляницкого, Г.В. Алферовой и А.С. Щенкова [4]. По отдельным городам выделим исследования С.В. Семенцова [5], посвященные Санкт-Петербургу, П.В. Сытина [6] и Н.Ф. Гуляницкого о Москве [4]. Заслуживают внимание научные статьи Ю.Г. Клименко о первом генеральном плане Москвы и вкладе французского архитектора Николя Леграна [7, 8]. История градостроительного развития Астрахани рассматриваемого периода отражена в монографиях и публикациях А.И. Осятинского [9], В.П. Никитина [10] и С.С. Рубцовой [11]. Важные замечания сделала искусствовед

М.Б. Михайлова в рамках рассмотрения биографии и творческого наследия А.П. Дигби [12].

Цель данного исследования – уточнить историю градостроительного развития Астрахани в последней четверти XVIII века и ввести новые архивные материалы в научный оборот. Были поставлены следующие задачи: 1) выявить и изучить архивные материалы о планах города рассматриваемого периода; 2) проанализировать планировочные особенности проектных чертежей и концепции размещения административных и общественных зданий; 3) обозначить вклад причастных исторических личностей и значение их работы в контексте градостроительной истории города. Объект исследования – проектные и фиксационные планы города Астрахани. Предмет исследования – градостроительные особенности проектных планов и их реализация в развитии планировочной структуры города.

Материалы и методы. Фактологической базой для исследования стали подлинные документы и графика из фондов Российского государственного исторического архива (далее РГИА), Государственного архива Астраханской области (далее ГААО) и репродукции планов Астрахани из фондов Российского государственного военно-исторического архива (далее РГВИА). Подробное изучение документов о проекте 1775 года, концептуальных предложениях 1786 года и

результатирующих решениях 1798 года в комплексе со сравнительным анализом результатов предшествующих исследований помогли сделать достоверные выводы и определить значение каждого из представленных этапов.

Основная часть. Долгие годы в научном обороте не имелось точных сведений о том, сколько было Высочайше утвержденных планов Астрахани во второй половине XVIII века. Наиболее известным и потому изученным был план города 1769 года, составленный под руководством архитектора А.В. Квасова на основе изысканий архитектурной команды Андрея Меньшова и рассуждений губернатора Н.А. Бекетова. Доктор архитектуры А.И. Осятинский отмечал план 1774 года [9], историк архитектуры и градостроительства Н.Ф. Гуляницкий писал о плане 1775 года, впервые раскрыв часть предложений губернатора П.Н. Кречетникова [4]. Точную информацию нам дает заметка из газеты «Астраханские губернские ведомости за 1841 г., посвященная истории Астрахани: «... с Высочайшего повеления подтверждены были планы: Первый в 1768 году, второй, исправленный против прежнего, в 1769, и, наконец, последний, с поправлением городских стен, в 1775 году» [13]. В фондах РГИА был выявлен чертеж 1775 года, визуально представивший все концептуальные предложения. Поскольку формат листа и графическое оформление подосновы полностью совпадают с проектом А. Меншова 1767 г. и исправленным вариантом плана 1768 г. [14], вероятно, что и данный проект составлен «экспедицией» под руководством архитектора Я.И. Шнейдера. Подобно другим планам города XVIII – I половины XIX вв. ориентация север-юг была перевернута на 180 градусов, поэтому на город мы смотрим по течению Волги с севера.

В 1773 году астраханским губернатором был назначен генерал-майор Петр Никитич Кречетников, руководивший большой территорией в непростые годы Пугачевского восстания. Угроза подобного нашествия на Астрахань заставила обратить внимание на оборонительные сооружения и общее состояние города. В июне 1775 года он подает доклад и новый план города (рис. 1), составленный архитектором Я.И. Шнейдером, в Комиссию о строении Санкт-Петербурга и Москвы. В своем обращении губернатор указывает на бедственное положение города, ввиду отсутствия финансовой помощи и строительных материалов. Обещанные после пожара 1767 года ссуды на строительство были розданы только чиновникам, в то время как купцы и мещане беспроцентных займов от государства не получили. Вся центральная часть города была в пустырях и развалинах, беднейшие горожане проживали в землянках, да и сам губернатор был вынужден жить в купеческом доме [15].



Рис. 1. План гор. Астрахани (проектный чертеж 1775 г. с визирующей подписью губернатора П.Н. Кречетникова) [РГИА. Ф.1293. Оп.168. Астраханская губерния. Д.26]. Публикуется впервые

Устройство губернаторского дома в Кремле на склоне бугра по плану 1769 года Кречетников считал не рациональным, поэтому новый каменный дом предполагался практически на том же месте, что и обветшавшее здание 1720 года постройки, на вершине кремлевского бугра для лучшего обзора местности. На проектной чертеже его акцентную роль по центральной оси от входа со стороны Белого города подчеркивают два симметрично расположенных дугообразных в плане корпуса: обер-комендантского и инженерного дома на юге и одного из проектируемых корпусов гарнизонной школы (вокруг бывшего Троицкого монастыря) на севере. Перпендикулярное направление создавали новые ворота (рядом с надвратной Никольской церковью) и прокурорский дом, что формировало полукруглую площадь перед губернаторским домом. Рядом с прокурорским обозначен дом для «губернаторских товарищей». Вдоль южной кремлевской стены размещены здания артиллерийских цейхгаузов. На месте лобного места архитектор Шнейдер запроектировал новую соборную колокольню восьмигранной формы с парными колоннами, а над главными западными воротами предполагалось возвести корпус магистрата и рыбной конторы. По сторонам от въезда «казенные, штрафные покои», над ними помещения присутственных мест, а венчать это здание должен был купол с часами, «коего здания благолепия города последует» [15]. В самом куполе надлежало находиться полицейскому городскому караулу и звонить в колокол в случае пожара.

На территории житного двора проектировались новые протяженные корпуса провиантских и винных магазинов (складских зданий). В Белом городе надлежало отремонтировать фасады и реконструировать русский гостиный двор, а объединенные индийский и армянский гостиные дворы снести и построить новый по утвержденному плану в два этажа. В отличие от плана 1769 года чрезмерно большая торговая площадь была уменьшена за счет еще одного квартала около иноземного гостиного двора. Проектом предполагалось восстановить во многих местах разрушенные стены Белого города, устроить бастионы (в большинстве случаев, напротив старинных башен) и вырыть ров вокруг. Губернатор выступал против сноса стен Белого города, поскольку считал, что при возможном нашествии неприятеля все жители не смогут укрыться за стенами кремля, поэтому стоит сохранить эти укрепления в оборонительных целях. Для этого же оставались свободные от застройки пространства перед стенами.

Укрупнение жилых кварталов форштадта и южных предместий с деревянной застройкой, которые на плане названы «куртинами», проектировалось за счет объединения продольно расположенных кварталов. «Куртины» форштадта губернатор рекомендовал увеличить до 30 саженей (64 м), «дабы жители могли иметь в глубину дома свои о пятнадцати и более сажень» [15], а участки должны были примыкать друг к другу без проходов для предотвращения от воровства. В целях благоустройства и избавления города от топкой грязи предлагалось расширить улицы до 11 саженей (23,47 м) вместо восьми, и устроить с обеих сторон сточные каналы шириной в одну с половиной сажени.

Вдоль южной набережной Кутума проектировались большие пристани для размещения торговых рядов: горянского, мучного, рыбного и мясного. На месте старой портовой таможни – новое здание с большой пристанью, примыкавшей в Никольской пристани, устроенной Н.А. Бекетовым к приезду Екатерины II (чего так и не случилось, [16]).

Описаны финансовые и административно-хозяйственные решения по казенному и обществу строительству с механизмами перспективного изыскания денежных средств и материалов. Понимая важность профессиональных кадров, губернатор П.Н. Кречетников, следуя опыту Н.А. Бекетова, считал, что при нем в Астрахани должен быть один архитектор для проектирования и надзора за строительством по всей губернии и один гезель (архитекторский помощник). Архитектурная «экспедиция» под его руководством должна была следить за количеством предоставленного строительного материала и вести учет долгов для возвращения денег в казну. В других городах губернии по надобности можно была держать одного гезеля.

После рассмотрения присланного плана и представления от губернатора в октябре того же года члены Комиссии (граф З.Г. Чернышев, П.Н. Кожин и Н.П. Архаров) подготовили доклад. Словно извиняясь за ранее утвержденное решение по сносу стен Белого города, указывалось, что прежний губернатор Н.А. Бекетов заявлял о ветхости и ненадобности этих оборонительных сооружений, поэтому на их месте были назначены новые кварталы для строительства домов. С предложениями о ремонте стен и строительстве казенных домов в кремле Комиссия согласилась, но решительно возразила против увеличения кварталов. Столь масштабные преобразования потребовали бы вновь сносов и изменения parcelляции участков, что и так было затруднительно при больших финансовых и материально-

технических трудностях для жилого строительства. В отредактированном плане было указано держаться «старых улиц, чтоб те же дворы остались на прежних своих местах, а улицы каналами обсушить и землею возвысить можно» [15]. В целях защиты от воровства разрешалось строить дома на обе улицы, но не увеличивать кварталов. Представленный проект императрица утвердила в Москве 3 ноября 1775 года.

Эта же дата зафиксирована на копии центральной части плана, составленной в 1781 году Астраханской инженерной командой [17]. Совмещение существующей и проектируемой регулярной застройки наглядно демонстрирует появление за шесть лет новых каменных зданий в границах Белого города и наличие пустопорожних мест. Значимым стимулом к увеличению каменного строительства послужили пожары 1777 и 1778 гг. Во время первого сгорело до 1000 домов по рекам Кутуму и Волге, хлебные амбары и деревянные пристани. Второй пожар произошел 11 апреля и причинил значительный ущерб постройкам Кремля и Белого города, сгорели архиерейский дом, консистория и колокольня [18]. Известно, что из кирпичей, разрушенных в пожаре 1778 г. зданий был построен дом священника И. Афанасьева, с главным фасадом на Вознесенскую улицу [19]. Градоформирующими объектами становятся не только торговые подворья, храмы и монастыри, но и партикулярные строения. В то же время отсутствие домов, фиксирующих планировочную структуру, разрушенные и обветшавшие стены и башни должны были вызывать противоречивое впечатление о городе. На месте будущей площади между гостиными дворами размещались временные мелочные ряды. Геометрически четкие участки на северном берегу Канала в границах новых кварталов свидетельствуют о реализации плана и за стенами Белого города.

Следующий этап градостроительного развития и формирования архитектурно-пространственного облика Астрахани начинается в 1785 году. 21 апреля Екатерина II подписывает «Грамоту на права и выгоду городам Российской Империи», где формально закрепляется обязательное строительство по Высочайше утвержденному плану [20]. Городскому магистрату предписывается вести обывательскую книгу для учета домов, строений и земельных участков под номерами, а также записывать сведения об их владельцах, переходе права собственности и так далее. 5 мая 1785 года вышел именной указ императрицы о создании Кавказского наместничества из Кавказской и Астраханской областей со ставкой в городе Екатеринограде. Несмотря на то, что в ре-

зультате административно-территориальных изменений Астрахань стала областным городом, в последующем указе ей уделяется особое внимание. Было поручено составить новый план и отправить его на рассмотрение в Комиссию о строении городов. Включены предложения губернатора Кречетникова из ранее утвержденного плана о ремонте и восстановлении каменных стен Белого города и устройства рва вокруг. Хотя в Грамоте закреплялась возможность обывателям иметь торговые лавки в своих домах, для Астрахани это право решено сократить, восстановить и отстроить гостиные дворы для получения дополнительных доходов в казну. В этих же целях в городском владении оставлялись казенные виноградные сады. Отдельные пункты посвящены учреждению народного училища, строительству нового адмиралтейства и возобновлению работы по устройству канала [20].

В 1786 году в письме к обер-коменданту А.О. Базину генерал-губернатор Кавказского наместничества П.С. Потемкин критикует бездействия предыдущих губернаторов в деле устройства города, упоминает об очередном пожаре весной 1785 года и о том, что во время его пребывания в Астрахани был сочинен новый план. Новые дома рекомендовалось строить в соответствии с присланным планом, а противоречащие строения запрещать перестраивать и ремонтировать. На данный момент чертежи к этому проекту не найдены, поэтому в нашем распоряжении только текстовые источники. Павел Сергеевич предложил зонирование города с дифференциацией по виду собственности, этажности и строительным материалам «для красоты оного и прочности»: 1) в Кремле – казенные каменные здания в три этажа с металлическим покрытием крыши; 2) в Белом городе – казенные здания, казармы и частновладельческие дома, каменные в два этажа с покрытием крыш черепицей (или металлическими листами); 3) в остальной части между Каналом и Кутумом – каменные здания в один этаж на погребах; 4) в Заканалье поперечные улицы с визуальными раскрытиями в центр города застраивать также каменными домами в один этаж, крытые черепицей; другие дома – деревянные на каменном фундаменте; 5) обывателям, которым будут выделены участки в других местах взамен отчуждаемых в Белом городе, указывалось строить деревянные здания в соответствии с планом; 6) в татарских слободах (Царевской, Безродной и прочих) разрешалось строить деревянные дома, а также каменные по желанию застройщиков [21]. Малоимущим жителям Белого города предлагалось оказать финансовую поддержку для смены места жительства и перенос дома в размере 25 рублей. Для компенсации

казенных расходов за строительство на Большой улице (соврем. Советской) и площадях указывалось брать по 80 копеек, на прочих улицах – по 40 копеек с квадратной сажени участка. В этой концепции закладывалось не только архитектурно-пространственное решение городской застройки, но и социальное зонирование, поскольку только богатые горожане могли приобрести участки и выстроить дома в Белом городе, малообеспеченные выселялись на окраины.

В этом же году на службу был приглашен итальянский архитектор А.П. Дигби. Некоторые биографические сведения об этом зодчем были представлены в публикациях астраханского краеведа А.С. Маркова [22] и искусствоведа М.Б. Михайловой [12]. Автором данной статьи были рассмотрены архитектурные особенности отдельных домовладений купца и первого директора Астраханского народного училища Д.А. Агафи, купца и благотворителя И.А. Варвация, сохранившихся строений гостинного дома 1790-х гг., а также градоформирующего ансамбля, созданного по заказу М.С. Делянчеева и перешедшего в 1798 году в казенное ведомство [19].

Параллельно с проектами партикулярных домов и ремонтами казенных строений А.П. Дигби вел активную градостроительную работу, создавая и редактируя планировочную структуру на чертежах и в натуре. В фондах РГВИА сохранились планы Астрахани за 1788, 1791, 1797, 1798, 1799 гг. Это позволяет не только определять время строительства отдельных зданий, но и изменения общегородских решений. Так на 1791 года предполагалось создание полукруглой площади напротив здания Адмиралтейства, чем была обусловлена форма корпусов Татарского гостинного двора, построенного в 1790-е гг. [23]. Но в итоге квартал, выходящий на набережную канала, утвержден в форме четырехугольника. Не вошли в финальную версию и окружающие Кремль и Белый город бастионы.

Рассмотрим план города 1798 года, составленный под руководством Александра Дигби и подписанный астраханским гражданским губернатором И.С. Захаровым (рис. 2). Здесь в полной мере проявилось восприятие городской застройки в целом, а не разделение на собственно город, примыкающие к нему форштадт и предместья, что было характерно для планов 1760-х гг. Была сохранена формообразующая роль крепостных границ Белого города и Кремля. Благодаря возвращению статуса административного центра и экономической поддержке обывателей удалось застроить пустыри, оставшиеся после нескольких пожаров. Появились геометрически правильные кварталы из каменных домов по проектам А.П. Дигби. Главным композиционным центром

стала Пляц-парадная площадь, формируемая комплексом зданий М.С. Делянчеева с полукруглым изгибом торговых лавок, новыми домами, примыкающими к Русскому гостинному двору, и гостинным домом Приказа общественного призрения (построен в 1793–1795 гг.), за которым следовали здания второго торгового корпуса того же Приказа и Главного народного училища. Новыми домами закрепились и круглая площадь вокруг храма во имя Рождества Пресвятой Богородицы. Ансамблевый подход и синхронизация градостроительного замысла с архитектурой отдельных строений позволили создать парадные перспективы.

В пространстве между Кутумом и каналом были намечены новые кварталы взамен оставшейся хаотичной застройки. В сравнении с предыдущим проектом кварталы на северном берегу канала стали уже, но расположены в два ряда. Наиболее устойчивой оказалась регулярная планировка восточной части междуречья и национальных слобод Заканалья. Перспективное развитие города было направлено на юг, не смотря на затопляемость южных территорий во время половодья. На плане намечены новые кварталы с такой же шириной, какую указал архитектор Андрей Меньшой в 1760-е гг. В целом подходы Дигби отличались большей преемственностью и учетом местных особенностей на базе жизненного и практического опыта в Астрахани. На Паробичевом бугре зафиксирован комплекс богадельни и больницы Приказа общественного призрения, и намеченные кварталы вокруг Тихвинской церкви. В регулярной планировке были застроены восточные территории Ямгурцевой слободы и вокруг Иоанно-Предтеченского монастыря. Более четкая структура предлагалась для северного берега Кутума, но поскольку эта часть города только начала формироваться, в проектных решениях читается некоторая условность.

Границей города служил земляной вал и ров, а вся территория была разделена на 5 частей. Первая включала западную часть междуречья с Кремлем, Белым городом и Адмиралтейством. Граница со второй частью проходила по восточной стене Белого города и за каналом по современной улице Дарвина до реки Кривуши. Сюда же входило пространство между реками Кривушей и Кутумом. Третья часть за каналом была ограничена современными улицами Дарвина и Бэра и уходила на юго-восток до пограничного вала. На юго-западе выделена четвертая часть с церковью по имя Иоанна Златоуста и частью Паробичева бугра с Тихвинской церковью. Земляной вал был не только городской чертой, но выполнял защитную функцию от половодья. За гра-

ницей города у стрелки Волги и реки Царев располагалось татарское селение с рядовым расположением кварталов вдоль главной улицы. Обширная территория Закутумья была назначена пятой частью, здесь же в районе Ямчуревой слободы были расположены гарнизонный и артиллерийский госпитали. На севере был большой аптекарский сад. За восточной границей города на берегу речки Луковки запроектирован острог с тюрьмой.

боды были расположены гарнизонный и артиллерийский госпитали. На севере был большой аптекарский сад. За восточной границей города на берегу речки Луковки запроектирован острог с тюрьмой.



Рис. 2. План города Астрахани, утвержденный гражданским губернатором И.С. Захаровым 15 ноября 1798 г. Архитектор А.П. Дигби [РГИА. Ф.1399. Оп.1. Д.253. Л.2]. Публикуется впервые

За полгода до этого проекта, в мае 1798 года, членами Астраханской инженерной команды был составлен фиксационный план города (рис. 3). Здесь хорошо видны особенности рельефа (те- нями обозначены бугры) и существовавшие в то время водотоки и ильмени. Деление городской застройки представлено в привычном для XVIII века виде: Кремль, Белый город, Житный двор и слободы: Царевская, «Парбучевская», Безродная, Татарская, Армянская, Старо-армянская, Солдат- ская, Казанская, «Огурчевская». Все, что находи- лось за крепостными стенами, так и обозначено – «за городом». Территория Кремля была практи- чески свободна, здесь располагались: соборная церковь Успения Пресвятой Богородицы, архи- ерейский дом со службами, церковь бывшего Троицкого монастыря, гауптвахта, пороховые погреба (около Артиллерийской и Красной ба- шен), один инженерный и несколько артиллерий- ских цейхгаузов. Соборная колокольня была разобрана еще 1770 году, поэтому в проломе ка- менных стен устроены деревянные ворота. В Житном дворе были провиантские магазины и

три винных погреба. Стены и башни Белого го- рода пребывали в ветхом состоянии (южная стена была практически полностью разрушена и заменена тыном), но именно в этих границах была сосредоточена большая часть каменных зданий. За счет художественного приема с те- нями на плане в первую очередь выделяются пра- вославные церкви: Входеоерусалимская, Ни- кольская, Знаменская, Рождественская, Смолен- ская и Преображения Господня в Спасском муж- ском монастыре. Между старинными Русским и Иноземным гостиными дворами сформировался ансамбль Плац-парадной площади с важней в центре. К югу, между Большой и Вознесенской улицами, обозначен уже упомянутый «казенный дом, в коем торговые лавки и при оном Народное училище». Не подписаны, но хорошо видны но- вые дома И.И. Агафи, И.А. Варваца и К. Федо- рова. В 1790-е гг. был построен каменный гости- ный дом с П-образно, расположенным корпусом складов (на плане записан под № 36 – торговые лавки, а в 1810 году принадлежал армянину Ни- китину [19]). Зафиксированы и другие гостиные дворы с периметральной застройкой участка.

Один из них под № 32 на Большой улице назван Персидским. Контора Коммерческого банка располагалась в доме около церкви Николая Чудотворца, а аптека – через дорогу, в здании Русского двора. Реальная ситуация показывает, что круглая форма Рождественской площади еще не

получила должный облик. Можно заключить, что настоящий респектабельный вид приобрели только главная площадь и Большая улица с практически «сплошными фасадами» каменных строений.



Рис. 3. План города Астрахани с показанием, в каком состоянии оной ныне находится. Сочинен при Астраханской Инженерной Команде. Май 1798 г. [РГИА. Ф.1399. Оп.1. Д.253. Л.3]. Публикуется впервые

На территории междуречья стоит выделить комплекс Адмиралтейства, Татарский гостинный двор, Благовещенский женский монастырь, комплекс Католической церкви и каменный гостинный двор с деревянной пристанью на берегу Кутума, построенный Т.Д. Лошкаревым и его наследниками в середине XVIII века. Развитию строительства в южной части междуречья препятствовали солончаки, поэтому застройка здесь еще имела хаотичный характер, как и застройка северной части, которой начали заниматься только в начале XIX века, руководствуясь планом 1801 года. В экспликации к плану не подписан изображенный армянский храм Успения Пресвятой Богородицы. Обмеление территории около стен Кремля привело к формированию новой части города – Косы, хотя по проекту А.П. Дигби пытались сохранить канал от устья Кутума до Никольской пристани, где располагались соляные амбары и лавка [22].

Кварталы, расположенные к югу от канала, представляли единую регулярную застройку, но традиционно дифференцировались на слободы по национальному признаку и социальному статусу жителей. Царевская татарская слобода располагалась обособленно, но тоже включалась в общегородское развитие. В отличие от рядовой застройки главной улицы, расположение участков на двух берегах у истока реки Царев было хаотичным. Здесь располагалось 11 мечетей. Духовным центром Безродной слободы на Киселевском бугре была церковь во имя Иоанна Златоуста. В Татарской слободе было три мечети, из которых выделена главная для всех татар Астрахани – Белая мечеть. Застройка Ново-Армянской слободы отличалась порядочным видом домов и улиц все прошлые десятилетия, поэтому каменных зданий здесь было больше, чем в прочих слободах. В одном из кварталов возвышался камен-

ный армянский Петропавловский храм, а в соседнем находилась деревянная лютеранская кирха. Недалеко от домовладения бывшего губернатора Н.А. Бекетова стояла православная церковь Святой Троицы. В Ямгурчеевской слободе было две церкви – во имя Михаила Архангела и в честь святых мучеников Фрола и Лавра. Восточнее жилых кварталов находился комплекс каменных зданий лазарета для гарнизонных батальонов с церковью Скорбящей Богородицы и деревянные корпуса артиллерийского лазарета. Главным планировочным центром Солдатской слободы был квадратный периметр крепостных стен Иоанно-Предтеченского мужского монастыря. Через квартал располагалась церковь Введения во храм Пресвятой Богородицы. Казанская слобода получила наименование по церкви во имя Казанской иконы Божией Матери. Также в северной части города за Кутумом находилась церковь Рождества Христова, а зеленым обозначен участок Аптекарского сада.

Динамику партикулярного строительства можно проследить по статистическим данным. В 1785 году во всей Астрахани было 40 каменных и 3773 деревянных обывательских домов [24], в 1791 году – 3988 домов [13], а в 1801 году насчитывалось 3840 домовладений, из которых 130 каменных [11].

Выводы. На основе архивных документов и сопоставительного анализа удалось дополнить сведения о градостроительных проектах для Астрахани и их реализации в последней четверти XVIII века. В научный оборот введен ранее не атрибутированный план 1775 г., представляющий первоначальный вариант предложений губернатора П.Н. Кречетникова. Также уточнены сведения о концепции 1786 года и представлены фиксационный план Астраханской инженерной команды и проект архитектора А.П. Дигби 1798 года. В рамках данного исследования сделаны следующие выводы:

1. План 1775 г. является важным этапом формирования планировочной структуры Астрахани, связанным с деятельностью губернатора П.Н. Кречетникова и архитектурной команды Я.И. Шнейдера. Была сохранена градоформирующая роль стен и башен Белого города, обозначен новый квартал для уменьшения торговой площади, отредактированы кварталы на северном берегу канала.

2. Астраханская инженерная команда продолжила работу по составлению топографических планов города, фиксируя изменения застройки и появления каменных зданий. Наиболее интересны чертежи 1781, 1788, 1791 и 1798 гг., где совмещали реальное состояние и проектные

планы, а также обозначали рельеф и гидрографию.

3. В концепции, написанной П.С. Потемкиным в 1786 г., впервые отходят от восприятия городской застройки обособленными частями (город – форштадт – предместья), а предлагается общее решение с зонированием по этажности и строительным материалам для новых зданий. Приглашение в том же году профессионального архитектора с европейским образованием способствовало рациональной синхронизации общих градостроительных процессов и частных архитектурных заказов.

4. Несмотря на то, что планы 1769 и 1775 гг. стали значимыми этапами в формировании планировочной структуры Астрахани, важнейший градостроительный вклад внес А.П. Дигби. Работая в Астраханской губернии при двух генерал-губернаторах и нескольких гражданских губернаторах, он смог довести все проектные замыслы до финального результата. В 1798 году новый план Астрахани был подписан губернатором И.С. Захаровым, а в 1801 году Высочайше утвержден императором Александром I вместе с правилами, «как производить строение».

5. В последней четверти XVIII века опустошенные несколькими пожарами территории Белого города были застроены каменными домами, появились регулярные кварталы с композиционным и смысловым центром на Пляц-парадной площади. Большая улица приобрела респектабельный облик, круглая площадь вокруг Рождественского храма стала оформляться каменными зданиями. В городскую черту вошли восточные (с регулярной планировкой) и северные территории Закутумья. Перспективное развитие города была направлено на юг, не смотря на существовавшие водоемы и затопление части территорий во время половодья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шкварики В.А. Очерк истории планировки и застройки русских городов. Москва: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1954. 204 с.
2. Лавров В.А. Развитие планировочной структуры исторически сложившихся городов. Москва: Стройиздат, 1977. 176 с.
3. Саваренская Т.Ф., Швидковский Д.О., Петров Ф.А. История градостроительного искусства. Поздний феодализм и капитализм: Учеб. для вузов. Москва: Стройиздат, 1989. 391 с.
4. Русское градостроительное искусство: Москва и сложившиеся русские города XVIII – первой половины XIX веков / НИИ теории архитектуры и градостроительства; Под общ. ред. Н.Ф. Гуляницкого. Москва: Стройиздат, 1998. 440 с.

5. Семенцов С.В. Формирование градостроительного генетического кода Санкт-Петербурга в XVIII–XX столетиях // Градостроительное искусство: Новые материалы и исследования. Вып. 1. Москва: КомКнига, 2007. С. 338–367.
6. Сытин П.В. История планировки и застройки Москвы. Материалы и исследования. Т.2: 1762–1812. Москва, 1954. 621 с.
7. Клименко Ю.Г. «Прожектированный» план Москвы 1775 года (к вопросу об атрибуции чертежей) // Архитектурное наследие. 2012. Вып. 56. С. 102–112.
8. Клименко Ю.Г. Н. Легран в Архитектурной экспедиции московской Управы благочиния // Градостроительное искусство: Новые материалы и исследования. Вып. 1. Москва: КомКнига, 2007. С. 200–220.
9. Осятинский А.И. Строительство городов на Волге. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1965. 191 с.
10. Никитин В.П. Этапы формирования планировочной структуры Астрахани с XVI по XIX в. // Вопросы охраны, реставрации и пропаганды памятников истории и культуры. 1979. № 78. С. 87–105.
11. Рубцова С.С. Градостроительная эволюция Астрахани, в 2-х книгах. Книга 1: Строительная история. Ульяновск: Ульяновский дом печати, 2017. 448 с.
12. Михайлова М.Б. Градостроительная деятельность в Астрахани и Керчи архитекторов А.П. и А.А. Дигби (последняя четверть XVIII – первая половина XIX века) // Градостроительное искусство: Новые материалы и исследования. Вып. 1. Москва: КомКнига, 2007. С. 164–199.
13. Астраханские губернские ведомости. 1841. № 21. Прибавление (неофиц. часть). С.102–105.
14. Березкин С.А. Этапы разработки и архитектурно-градостроительная значимость первого генерального плана Астрахани (1767–1769 гг.) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 6. С. 43–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-43-56
15. РГИА. Ф.1310. Оп.1. Дела. Д.53. О планах городу Астрахани. 1768–1775 гг.
16. Гусарова Е.В. Астраханские находки: История, архитектура, градостроительство Астрахани XVI–XVIII вв. по документам из собраний Петербурга. СПб.: Нестор-История, 2009. 492 с.
17. Воротникова И.А., Неделин В.М. Кремли, крепости и укрепленные монастыри Русского государства XV–XVII веков. Крепости восточных рубежей России. Книга I. Москва: ФГБУК «Государственный историко-культурный музей-заповедник “Московский Кремль”», БуксМАрт, 2020. 800 с.
18. Штылько А.Н. Астраханская летопись: исторические известия, события, постановления правительственных и др. учреждений и факты из общественной жизни г. Астрахани с 1554 г. по 1896 г. включительно. Астрахань: Тип. Н.Л. Рослякова, 1897. 126 с.
19. Березкин С.А. Жилая архитектура последней четверти XVIII века в Астрахани. Архитектон: известия вузов. 2023. №2 (82). URL: http://archvuz.ru/2023_2/9/ (дата обращения: 15.08.2023). DOI: 10.47055/19904126_2023_2(82)_9
20. Полное собрание законов Российской империи. 1-ое собр. Т. XXII: С 1784 по 1788. СПб.: Типография II отделения Собственной Е.И.В. канцелярии, 1830. 1174 с.
21. ГААО. Ф.476. Оп.3. Д.45. Переписка с главнокомандующим Кавказской губернии о составлении нового плана г. Астрахани. 1786 г.
22. Марков А.С. Варвакис. Документальное повествование. Астрахань: ГУП «ИПК «Волга», 2000. 304 с.
23. РГВИА. Ф.349. Оп.3. Д.2491. План Астрахани. 1791 г.
24. О нынешнем состоянии города Астрахани (Истор. Месяц. на 1785 год) // Собрание сочинений, выбранных из месяцесловов на разные годы: Ч. VII. Санкт-Петербург, 1791. С. 1–32.

Информация об авторах

Березкин Сергей Александрович, аспирант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: berezkin.s.official@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 24.08.2023 г.

© Березкин С.А., 2023

Berezkin S.A.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: berezkin.s.official@gmail.com

URBAN PLANNING DEVELOPMENT OF ASTRAKHAN IN THE LAST QUARTER OF THE XVIII CENTURY

Abstract. The urban planning history of Astrakhan continues to be one of the most relevant research topics, both in the all-Russian context and at the local level for understanding the stages of shaping the urban structure. This article presents clarifications about the planning development of Astrakhan in the last quarter of the XVIII century. Based on archival data, the proposals of Governor Krechetnikov P.N. and the initial project of 1775, created under the direction of architect Schneider Y.I., are identified. This plan was the last highly approved in the XVIII century after the correction by the Commission for the Stone Construction in Saint Petersburg and Moscow. The information about the concept of Potemkin P.S. on the zoning of the territory with the gradation of buildings by number of stories and building materials has been supplemented. Despite the significant role of administrative leaders, architect Digbi A.P. made an important contribution to the creation of the respectable appearance of the central part of the city, consisting of ensembles of administrative, public and residential buildings. The plan of 1798 was approved by the civil governor Zakharov I.S. Emperor Alexander I confirmed the plan in 1801. All parts of the city were integrated into a single system and a regular planning structure was formed as a result of state regulation and support for private construction. Previously unpublished graphic materials from the funds of the Russian State Historical Archive have been analyzed and introduced into scientific circulation.

Keywords: general plan of Astrakhan, regular layout, quarterly development, Astrakhan Governor Krechetnikov P.N., architect Schneider Y.I., Caucasian Governor General Potemkin P.S., architect Digbi A.P.

REFERENCES

1. Shkvarikov V.A. Essay on the history of layout and construction of Russian cities [Ocherk istorii planirovki i zastrojki russkih gorodov]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arhitekture, 1954. 204 p. (rus)
2. Lavrov V.A. Development of the planning structure of historically formed cities [Razvitie planirovochnoj struktury istoricheski slozhivshisya gorodov]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 176 p. (rus)
3. Savarenskaya T.F., Shvidkovsky D.O., Petrov F.A. History of urban planning art. Late Feudalism and Capitalism: Textbook for Universities [Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. Pozdnij feodalizm i kapitalizm: Ucheb. dlya vuzov]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 391 p. (rus)
4. Russian urban planning art: Moscow and the established Russian cities of the XVIII - the first half of the XIX centuries [Russkoe gradostroitel'noe iskusstvo: Moskva i slozhivshiesya russkie goroda XVIII – pervoj poloviny XIX vekov]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 440 p. (rus)
5. Sementsov S.V. Formation of the urban genetic code of St. Petersburg in the XVIII-XX centuries [Formirovanie gradostroitel'nogo geneticheskogo koda Sankt-Peterburga v XVIII–XX stoletiyah]. Urban planning art: New materials and research. Issue 1. Moscow: KomKniga, 2007. Pp. 338–367. (rus)
6. Sytin P.V. History of the planning and development of Moscow. Materials and research [Istoriya planirovki i zastrojki Moskvy. Materialy i issledovaniya]. Vol. 2: 1762–1812. Moscow, 1954. 621 p.
7. Klimenko J.G. «Projected» plan of Moscow in 1775 (to the question of the attribution of drawings) [«Prozhektirovannyj» plan Moskvy 1775 goda (k voprosu ob atribucii chertezhej)]. Architectural Heritage. 2012. No. 56. Pp. 102–112. (rus)
8. Klimenko J.G. N. Legran at the Architectural Expedition of the Moscow Council of Prosperity [N. Legran v Arhitekturnoj ekspedicii moskovskoj Upravy blagochiniya]. Urban planning art: New materials and research. Issue 1. Moscow: KomKniga, 2007. Pp. 200–220. (rus)
9. Osyatinsky A.I. Construction of cities on the Volga [Stroitel'stvo gorodov na Volge]. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 1965. 191 p. (rus)
10. Nikitin V.P. Stages of formation of the planning structure of Astrakhan from the XVI to the XIX century [Etapy formirovaniya planirovochnoj struktury Astrahani s XVI po XIX v.]. Voprosy ohrany, restavracii i propagandy pamyatnikov istorii i kul'tury. 1979. No. 78. Pp. 87–105. (rus)
11. Rubtsova S.S. Urban planning evolution of Astrakhan. Book 1. Construction history [Gradostroitel'naya evolyuciya Astrahani. Kniga 1: Stroitel'naya istoriya]. Ulyanovsk: Ulyanovsk House of Printing, 2017. 448 p. (rus)
12. Mikhailova M.B. Urban planning activity in Astrakhan and Kerch by architects A.P. and A.A. Digbi (the last quarter of the XVIII – first half of the XIX century) [Gradostroitel'naya deyatel'nost' v

Astrakhani i Kerchi arhitektorov A.P. i A.A. Digbi (poslednyaya chetvert' XVIII – pervaya polovina XIX veka)]. Urban planning art: New materials and research. Issue 1. Moscow: KomKniga, 2007. Pp. 164–199. (rus)

13. Astrakhan provincial Gazette [Astrahanskije gubernskie vedomosti]. 1841. No. 21. Addendum (unofficial part). Pp. 102–105. (rus)

14. Berezkin S.A. Stages of development and architectural and urban planning significance of the first general plan of Astrakhan (1767–1769). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 6. Pp. 43–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-43-56

15. Russian State Historical Archive [RGIA]. F.1310. Op.1. D.53. About the plans for the city of Astrakhan. 1768–1775. (rus)

16. Gusarova E.V. Astrakhan finds: History, architecture, urban planning of Astrakhan of the XVI–XVIII centuries, according to documents from the collections of St. Petersburg [Astrakhanskiye nakhodki: Istoriya, arkhitektura, gradostroitel'stvo Astrakhani XVI–XVIII vv. po dokumentam iz sobraniy Peterburga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2009. 492 p. (rus)

17. Vorotnikova I.A., Nedelin V.M. Kremlins, fortresses and fortified monasteries of the Russian state of the XV–XVII centuries. Fortresses of the eastern borders of Russia. Book 1 [Kreml'i, kreposti i ukreplennye monast'iry Russkogo gosudarstva XV–XVII vekov. Kreposti vostochnykh rubezhej Rossii. Kniga I]. Moscow: State Historical and Cultural Museum-Reserve «Moscow Kremlin», BuksMArt, 2020. 800 p.

18. Shtylko A.N. Astrakhan Chronicle: historical news, events, resolutions of government and

other institutions and facts from the public life of Astrakhan from 1554 to 1896 inclusive [Astrakhanskaya letopis: istoricheskie izvestiya, sobyitiya, postanovleniya pravitel'stvennykh i dr. uchrezhdenii i fakty iz obshchestvennoi zhizni g. Astrakhani s 1554 g. po 1896 g. vkluchitel'no]. Astrakhan: N.L. Roslyakov Printing House, 1897. 126 p.

19. Berezkin, S.A. Residential architecture of the last quarter of the 18th century in Astrakhan. Architecton: Proceedings of Higher Education. 2023. No. 2 (82). URL: http://archvuz.ru/en/2023_2/9/ (date of treatment: 15.08.2023). DOI: 10.47055/19904126_2023_2(82)_9

20. Complete Collection of Laws of the Russian Empire [Polnoe Sobranie Zakonov Rossijskoj Imperii]: 1st sobr. Vol. XXII : From 1784 to 1788. St. Petersburg: Printing Office of the Second Department of His Imperial Majesty's Own Chancellery, 1830. 1174 p. (rus)

21. State Archive of the Astrakhan Region. F.476. Op.3. D.45. Correspondence with the commander-in-chief of the Caucasian province about drawing up a new plan for Astrakhan. 1786.

22. Markov A.S. Varvakis. Documentary narration [Varvakis. Dokumentalnoe povestvovanie]. Astrakhan: Publishing and printing complex «Volga», 2000. 304 p. (rus)

23. Russian State Military Historical Archive [RGVIA]. F.349. Op.3. D.2491. Plan of Astrakhan. 1791.

24. About the current state of the city of Astrakhan (1785). Collection of essays selected from the menologions of different years [Sobranie sochinenij, vybrannyh iz mesyaceslovov na raznye gody]: Part VII. St. Petersburg, 1791. Pp. 1–32. (rus)

Information about the authors

Berezkin, Sergey A. Postgraduate student. E-mail: berezkin.s.official@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., 4.

Received 24.08.2023

Для цитирования:

Березкин С.А. Градостроительное развитие Астрахани в последней четверти XVIII века // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 57–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-57-67

For citation:

Berezkin S.A. Urban planning development of Astrakhan in the last quarter of the XVIII century. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 57–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-57-67

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77

Супранович В.М.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: vmsupranovich@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ МУСОРОСОРТИРОВКИ И МУСОРОПЕРЕРАБОТКИ В РОССИИ

Аннотация. В статье представлены материалы исследования особенностей градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России. Приведены данные комплексного анализа исторических этапов обращения с отходами в стране и, как следствие, формирование практики по созданию объектов обращения с ними. Изучены существующие объекты мусоросжигательных заводов, а также комплексы переработки отходов, которые предполагаются к возведению по всей стране в будущем. Выполнен анализ градостроительных характеристик отечественных производств. Разработаны графические схемы размещения объектов по обращению с отходами в соответствии с профилем предприятия (сжигание или сортировка-переработка). Выявлены особенности их размещения: изолированность предприятий вне зависимости от места размещения (внутри или внегородских границ), зависимость площадных характеристик и формы участка от назначения производства, композиционное решение генерального плана территории и организация транспортной доступности объектов. Дана оценка дальнейшего развития предприятий мусоросортировки и мусоропереработки в России с учетом мировых тенденций развития «устойчивой архитектуры» промышленных зданий.

Данные публикуются по результатам проведения научно-исследовательской работы «Принципы градостроительной и архитектурно-планировочной организации объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России», в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2023 году.

Ключевые слова: промышленная архитектура, градостроительное размещение, объекты мусоросортировки, объекты мусоропереработки, устойчивое развитие, Россия.

Введение. Экономическое развитие государства зависит от множества факторов, в том числе, от развития промышленного сектора [1]. За последние десятилетия Россия прошла путь от сокращения и переноса существующих предприятий в городской среде до возвращения к устойчивому производственному развитию [2], с учетом интеграции ряда заводских объектов в систему городов [3, 4].

Зарубежный опыт подтверждает успешное функционирование предприятий, включенных в городской контекст [5, 6]. Тенденции обращения к принципам «устойчивого развития архитектуры» влияют на градостроительные и объемно-планировочные подходы при проектировании промышленных объектов, гуманизируя их облик [7, 8]. Среди таких объектов необходимо отметить заводы по переработке мусорных отходов, которые решают экологическую проблему обращения с ТБО (твердые бытовые отходы) и их оптимального использования в качестве возобновляемого ресурса [9, 10].

На современном этапе проблема утилизации отходов в России не решена: по данным счетной палаты ежегодно в стране образуется от 65 – 70 млн. тонн бытовых отходов, которые утилизируются на открытых полигонах (свалках) [1, 11]. Объем отходов ежегодно увеличивается на 1–2 % [1, 12]. Существующие объекты по переработке

отходов работают не в полную мощность, а их строительство вызывает острые социальные споры и противодействие со стороны населения [13]. Во многом, это продиктовано устаревшим подходом к градостроительному размещению производственных зданий, их изолированностью от других функциональных зон в городской среде [7]. Поэтому, несмотря на наличие существующих объектов по переработке и утилизации отходов, стоит задача создания полноценной системы современных объектов мусоросортировки и мусоропереработки, не только с точки зрения технологических требований, но с учетом принципов «устойчивого развития архитектуры» промышленных объектов.

В данной статье представлены результаты проведения научно-исследовательской работы «Принципы градостроительной и архитектурно-планировочной организации объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России», в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2023 году.

Целью публикации является выявление особенностей градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России.

Задачи исследования:

- изучить исторические этапы обращения с отходами в России;
- определить градостроительные характеристики размещения существующих объектов мусоропереработки и мусоросортировки в России;
- выявить особенности градостроительного размещения существующих объектов мусоропереработки и мусоросортировки в России;
- определить основные схемы размещения объектов мусоропереработки и мусоросортировки и возможность их дальнейшего использования для вновь проектируемых промышленных объектов с учетом общемировых тенденций к «развитию устойчивой архитектуры».

Объект исследования – градостроительное размещение объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России.

Материалы и методы исследования. Общие вопросы интеграции промышленных объектов в городскую среду, а также устойчивое развитие архитектуры промышленных зданий изучены в отечественных работах Сазыкиной Е.В., Дмитриевой А.О., Шамаевой Т.В. и международных Жаннин Мюллера и Рамарадж А., Нагаммал Дж. Пути гуманизации архитектурного образа рассмотрены в материалах Георгулиас А., Кара Х., Асенцио Виллория Л. Особенности возможных вариантов размещения объектов мусоропереработки и мусоросортировки в городской среде исследованы в работах Супранович В.М. и Сафроновой А.Д. Вопросы экологических и технологических особенностей обращения с отходами изучены в работах Рыжих Ю.С., Рывкина М.Д. и Рожкова Р.С. Отдельное внимание уделено исследованиям Ляпунова К. и другим источникам по историческому развитию объектов обращения с отходами.

Для выявления особенностей градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России использованы следующие **методы исследования**:

- комплексный анализ и систематизация данных изучения исторических этапов обращения с отходами в России. Даны характеристики временных периодов обращения с отходами, с учетом городского и сельского контекста размещения территорий для утилизации, их общие и индивидуальные характеристики;
- комплексный анализ существующего отечественного опыта градостроительного размещения объектов по обращению с отходами в России. Выявлены особенности организации участка внутри/вне городских границ, удаленно-

сти от жилой застройки, первоначальное функциональное зонирование территории, и прочие характеристики.

Основная часть. К сожалению, в России существует тенденции «разделения» строительных и архитектурных подходов к реализации тех или иных объектов, в том числе, и в подходах к реализации промышленных зданий. Получение максимальной прибыли при минимальных затратах, приводит к «обеднению» архитектурно-художественной составляющей объектов. Многие проекты выполняются по «традиционным» проектным подходам, поэтому для предложения новых или модернизации существующих, необходимо изучить эволюцию исторических этапов обращения с отходами, и выявить основные градостроительные особенности размещения существующих объектов по утилизации мусора.

Комплексный анализ изучения исторических этапов обращения с отходами в России. Этапы развития объектов сбора и утилизации отвечают историческим этапам развития страны [1, 14]:

1) Становление российского государства и царская Россия [1, 15]. Для данного этапа характерно разделение на деревенскую и городскую систему обращения с отходами. Деревенская жизнь предполагала практически безотходный уклад жизни: компостирование органических отходов, сжигание прочего сора в печи и т.д. [15] Для города же была характерна утилизация органических и твердых отходов. Причем изначально данный способ не имел нормированного системного подхода, поэтому мусор сбрасывали в водоемы, на улицы, а также, в ряде случаев, вывозили мусор на окраины поселений. Данный подход вел к загрязнению городской среды и созданию антисанитарных условий [1, 15].

Для улучшения экологической обстановки в городах были проведены инженерно-технические мероприятия: создание системы канализации, очистка водоемов от загрязнений, а также выделение участков («пустырей») на окраинах городов или за границами поселения [1, 15]. Таким образом, начала формироваться градостроительная практика «отчуждения» зон сбора отходов и их размещения на периферии города, без каких-либо мероприятий по сортировке и вторичному использованию;

2) СССР. Для данного исторического периода характерной особенностью стала систематизация процесса утилизации отходов: разделение мусора на «категории», активной социальной политики государства по сбору и вторичному использованию таких видов мусора как бумага, стекло, металл [9]. Органические отходы вто-

рично использовались для корма скота или предполагались к захоронению на полигонах. Устройство полигонов предполагались вне городских границ. Более того, первые полигоны не имели какой-либо специальной инженерной подготовки территории, так как предполагалось, что на них будут размещаться только органические отходы, не загрязняющие почву и водоемы [16]. Для вторсырья организовывались пункты приема: адаптированные помещения или здания в жилых районах городов, и «мобильные пункты сбора» - грузовые автомобили или контейнеры [1, 9]. Система предполагала оптимальную пешеходную доступность для сдачи мусора. После сбора отходы направлялись на предприятия по переработке. Также в семидесятых годах двадцатого века в Московской области были построены мусоросжигательные заводы, такие как Спецзавод № 2 и № 3 [16].

Для сельской местности сохранилась тенденция к безотходному образу жизни, но уже в менее выраженном виде, в связи с появлением новых видов отходов. Поэтому организация сбора и захоронения отходов, принятая в городах, стала актуальной и для загородной жизни.

Таким образом, в эпоху СССР социальная программа по обращению с отходами закрепила градостроительный подход к организации «полигонов» вне городских границ. В промышленные зоны (в основном вне городских границ) с учетом санитарно-защитных разрывов были внедрены объекты по сжиганию отходов. Объекты по сбору и дальнейшей переработке отходов были внедрены в существующую городскую среду, с учетом оптимальной доступности для населения;

3) Российская федерация. Текущий исторический период на начальном этапе демонстрирует полный отказ от политики мусоропереработки, а затем ее возобновление [9, 16]. Прошедшая индустриализация повлияла на характер отходов, как в городских, так и в сельских условиях. Безотходный образ жизни больше не свойственен для них. Появление таких видов мусора как пластик, тетрапак, не подлежащих переработке, требует появления объектов утилизации, как в крупных городах, так и в областных населенных пунктах [9]. К сожалению, основным объектом утилизации отходов остается мусорный полигон. Ряд компаний (Ростех, Эколайн и т.д.) занимаются строительством новых мусороперерабатывающих комплексов в России.

Комплексный анализ существующего отечественного опыта градостроительного размещения объектов по обращению с отходами в России.

При изучении вопроса обращения с отходами необходимо отметить, что сортировка мусора подразумевает его разделение на фракции, то есть виды, которые могут быть пригодны для дальнейшей переработки или нет. Под переработкой понимают как сжигание, то есть обращение в энергию продуктов горения или дальнейшее использование золы, так и повторное использование материалов. Поэтому предприятие может заниматься лишь сортировкой мусора, а дальнейшая переработка передается на другой специализированный завод, или представляет собой комплекс, в котором организована как сортировка, так и дальнейшая переработка отходов. В связи с оборотом некоторых видов пластика и упаковок, не подлежащих утилизации, также требуется организация полигонов для их захоронения.

Размещение объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России неоднородно. Это зависит от множества показателей, в том числе, от административного устройства процесса обращения с отходами. Так в Москве существует несколько объектов по переработке мусора, а в Санкт-Петербурге только предполагается реализация подобных проектов [1, 17], так как до 2020 года весь мусор направлялся на полигоны или на объекты мусоропереработки в Ленинградской области [9, 10]. Более того, Подмосковье является лидером в программе «Экология» [17]. Именно там были закрыты свыше 30 полигонов (свалок) и введены в эксплуатацию новые комплексы по переработке отходов (КПО). Необходимо отметить, что проекты КПО являются «типовыми» для таких компаний как «Эколайн», «Экотехмаш» и других. Успешная работа предприятий и внедрение новых подходов переработки мусора, демонстрируют положительные результаты в динамике сокращения отходов, поэтому подобные объекты предполагаются к реализации или уже находятся в стадии проектирования по всей стране, в том числе, в Республике Крым. Но, несмотря на передовые методы работы с ТБО, градостроительные и архитектурные решения данных объектов решаются, в первую очередь, исходя из технических и экологических требований к участку и зданиям. Это подтверждает изучение существующих примеров.

В таблице № 1 приведены основные данные по градостроительному размещению объектов мусоросжигания.

Особенностями размещения мусоросжигательных заводов являются:

– размещение участка внутри городских границ, но в функциональной зоне промышленных территорий;

– наличие прямого доступа к магистралям, для организации дорожно-транспортной связи с городом;

– сокращенное расстояние до зоны жилой застройки, по ряду таких причин, как модернизация процесса сжигания отходов, а также «разрасстания» зон селитебной застройки;

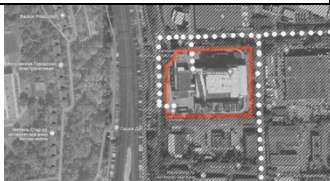
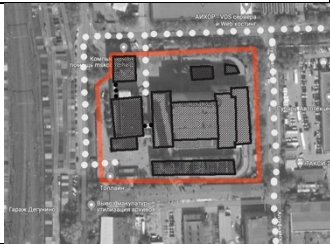
– «компактные» параметры участка застройки (от 2 до 3,5 га), характерная форма в плане - квадрат;

– процент площади застройки участка в среднем от 60–70 % с нормативным отступом 10–15 метров от границы участка;

– композиционное размещение основного объема здания/зданий – центральное, с организацией связи объемов через галереи или непосредственное примыкание одного объема к другому.

Таблица 1

Градостроительные характеристики объектов мусоросжигания

Объект	1. ГУП Спецзавод №2 (1975 г.)	2. ГУП "Спецзавод №3" (1983 г.)	3. ГУП "Спецзавод №4" (1996 г.)
Назначение	Мусоросжигательный завод	Мусоросжигательный завод	Мусоросжигательный завод
Проектная мощность	(75 тысяч тонн в год) 130 тысяч тонн в год	200 тысяч тонн в год	250 тысяч тонн в год
Место размещения	Россия, Северо-Восточный административный округ Москвы, Алтуфьевское шоссе, 33а	Россия, Южный административный округ Москвы, ул. Подольских Курсантов, 22 а	Россия, Москва, Восточный административный округ, территория промышленной зоны «Руднево»
Схема размещения			
Площадь участка	2,1 га	3,5 га	Около 2,5 га
Доступность магистралей	Да	Да	Да
Радиус до жилой застройки	Около 200–250 метров	Около 600 метров	Около 700–750 метров
Композиционная схема размещения технологических блоков			
Образное решение, в сложившихся градостроительных условиях			
Условные обозначения: — Предполагаемые границы участка; ●●●●● - Галерей, для связи функциональных блоков; ○ - Существующие проезды; ■ - Существующие функциональные блоки заводов; /// - Зона промышленной застройки; ■ - Зона жилой застройки;			

Таким образом, при относительно близком размещении к жилой застройке (радиус доступности от 200 до 700 метров), данные объекты изолированы от жителей за счет расположения внутри промышленных территорий, среди предприятий иного назначения. Объемы зданий размещены на участке компактно и образуют собой единую замкнутую композицию по всей площади территории, однако, с точки зрения взаимо-

действия с окружающим архитектурным контекстом, посадка блоков на участке не увязана, так как каждое предприятие является отдельным элементом не связанным друг с другом. В некоторых случаях, выполняется градостроительная связь административного блока завода, с учетом организации доступа для сотрудников. Это выражено за счет «углового» размещения здания и неограниченного доступа ко входу в здание.

Таблица 2

Градостроительные характеристики объектов мусоросортировки и переработки

Объект	1.	2.
	Комплекс переработки отходов «Восток» (2019 г.) (КПО)	Комплекс переработки отходов «Нева» (2021 г.) (КПО)
Назначение	Мусороперерабатывающий комплекс	Мусороперерабатывающий комплекс
Проектная мощность	1,1 млн. тонн отходов в год	500 тысяч тонн в год
Место размещения	Россия, городском округе Егорьевск, Московская область	Россия, городской округ Солнечногорск, Московская область
Схема размещения		
Площадь участка	Свыше 5 га	Свыше 5 га
Доступность магистралей	Доступность второстепенных дорог	Доступность второстепенных дорог
Радиус до жилой застройки	Около 3500 метров	Около 1000 метров
Композиционная схема размещения технологических блоков		
Образное решение, в сложившихся градостроительных условиях		
Условные обозначения:  - Предполагаемые границы участка;  - Зона создания полигона;  - Существующие проезды;  - Зона лесного массива;  - Участки застройки; <i>*Примечание: композиционные схемы размещения блоков даны с учетом существующих доступных данных карт и видео сообщений</i>		

В таблице № 2 представлены основные данные по градостроительному размещению так называемых КПО (комплексов переработки отходов).

Для КПО характерно:
- размещение вне городских границ, внутри лесных массивов, вдали от жилой застройки;

- наличие въезда на территорию с второстепенных дорог;
- значительные показатели площадей под застройку с обязательным выделением территории под новые полигоны утилизации для неперерабатываемых отходов (свыше 7,5 га);
- прямоугольная форма участка;
- строчное расположение цехов для организации технологического процесса сортировки и переработки, при этом связь между цехами осуществляется через проезды, каждый объем цеха – это отдельное здание.

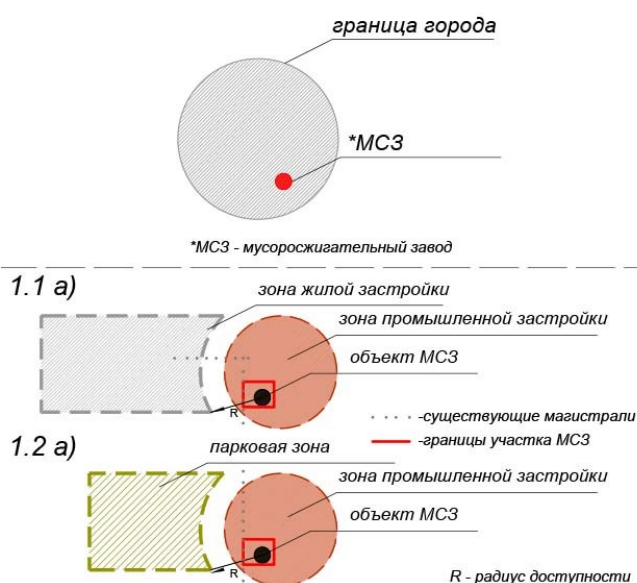
Как и в случае с мусоросжигательными объектами, для объектов мусоросортировки и мусоропереработки характерна изолированность от окружающего контекста, несмотря на то, что участки под КПО выделяются среди зеленого массива лесов. Это подтверждается технологическим «выравниванием» рельефа местности, типовым решением объемов зданий, отказом от организации многофункционального пространства участка. Производственные цеха имеют необходимые технологические показатели, но ввиду строчного расположения и отсутствия примыкания друг к другу (в том числе за счет архитектурных элементов), не образуют единой архитектурной композиции. Это ведет к сокращению лесного массива, изменению ландшафта, разрыву связей с природой, и обеднению архитектурно-художественных свойств объекта.

Выводы. Комплексное изучение исторического опыта обращения с отходами, а также су-

ществующих объектов мусоросортировки и переработки подтвердило развитие тенденций к «отчуждению» зон утилизации отходов. На территории страны действуют мусоросортировочные и мусороперерабатывающие заводы, некоторые из которых построены еще в эпоху СССР, но модернизированы с учетом экологических требований и технологических возможностей, для увеличения проектных мощностей. Градостроительное размещение мусоросжигательных и мусоросортировочных объектов требует организации ССЗ, что предполагает строительство объектов вне городских границ, либо внутри существующих или специально выделенных промышленных зонах. Поэтому, по результатам проведенного исследования, возможно выявить следующие общие особенности градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России:

- изолированность объекта (размещение в промышленной зоне, или в зоне лесных массивов пригородов);
- соответствие технологическим требованиям к участку для организации процесса производства сортировки, переработки, в том числе сжигания отходов;
- отсутствие использования принципов устойчивой архитектуры на уровне градостроительного решения объектов (связи с ландшафтом, окружающей застройкой, отсутствие многофункциональности территории участка и гуманизации среды).

1а) мусоросжигательный завод



1б) комплекс переработки отходов

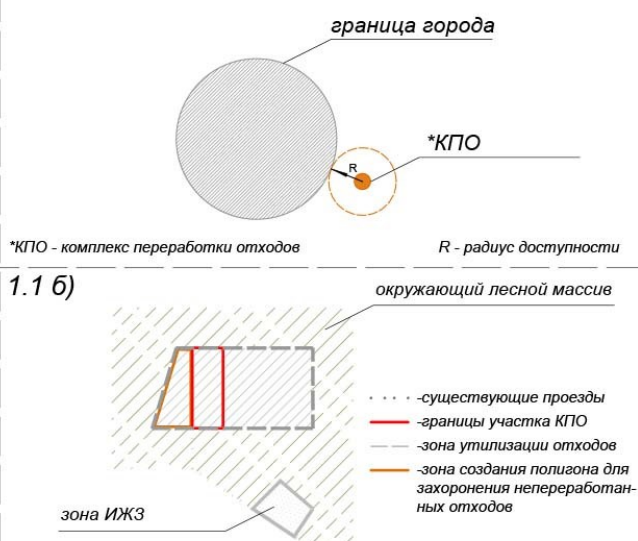


Рис. 1. Схемы существующих вариантов размещения объектов обращения с отходами в России относительно городских границ: 1а) Схема размещения МЗС; 1б) Схема размещения МПО

Количественные показатели территорий позволяют выявить взаимосвязь площади и

формы участков, а также подход к зонам размещения объектов в зависимости от специфики предприятия. Для мусоросжигательных заводов

характерно «компактное» размещение и тяготение к городской черте (рис. 1.1а, 1.2а), тогда как участки комплексов мусоросортировки и переработки выделены в пригородах, среди лесного массива и имеют значительные площади (рис. 1.1б).

Необходимо отметить, что проектирование и строительство предприятий по обращению с отходами является положительным аспектом социально-экологической политики государства. Однако методы реализации данных объектов демонстрируют устаревшие градостроительные подходы, при их рассмотрении в контексте развития устойчивой архитектуры. Изоляция предприятий за счет организации санитарно-защитных зон и размещения в существующих промышленных зонах требует пересмотра подходов.

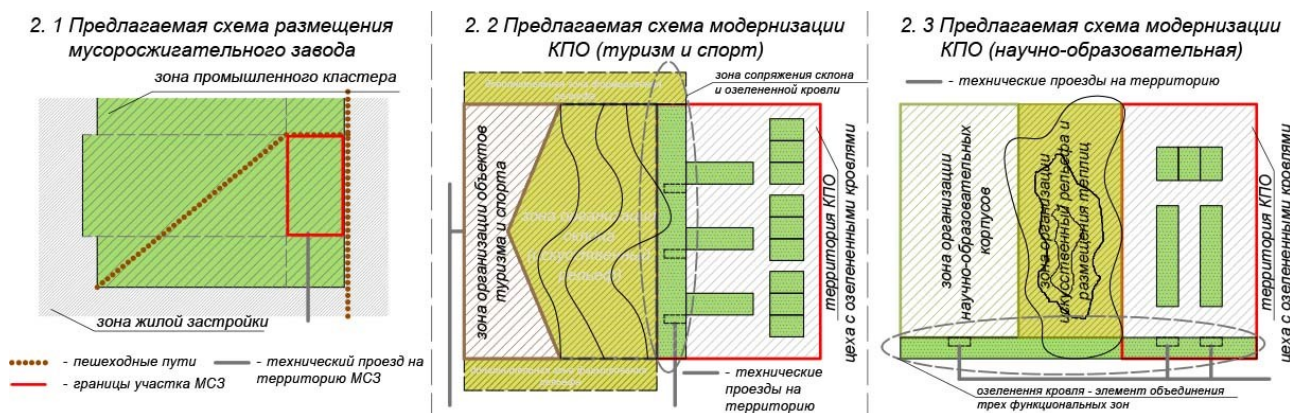


Рис. 2. Предлагаемые схемы модернизации размещения объектов обращения с отходами в России

Необходимо решать композиционное единство блоков для создания полноценного архитектурного образа здания, учитывая как технологические, так и эстетические качества объекта. Это позволит перевести монофункциональное использование территории в полифункциональное, то есть организовать:

- зоны туризма и спорта (горнолыжные курорты, базы отдыха) (рис. 2.2);
- научно-образовательные зоны, для изучения возможностей органических свойств «техно-грунта», получаемого при переработке отходов (дополнительные функциональные блоки зданий лабораторий) (рис. 2.3).

Применение данных подходов позволит перейти архитектуре промышленных объектов на новую ступень устойчивого развития, модернизировать методы проектирования данных объектов, избежать деградации производственных территорий, окружающей среды и решить социально-экологические и экономические задачи государства.

Источник финансирования. Конкурс грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками

Применение новейших технологий по сжиганию отходов и минимизацией выбросов, позволит интегрировать данные предприятия в городские общественные кластеры, и обеспечить организацию социально-просветительских программ для населения (рис. 2.1). Другими словами организовать многофункциональное использование территории (городской промышленный туризм). Что касается комплексов переработки отходов, то их размещение в существующих лесных массивах должно учитывать интеграцию в существующий ландшафт. Это возможно благодаря использованию эксплуатируемых зеленых кровель, созданию искусственного рельефа, на месте полигонов неперерабатываемых отходов.

Санкт-Петербургского Государственного Архитектурно-строительного Университета (СПбГАСУ) в 2023 году.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Супранович В.М. Архитектура объектов мусоропереработки в России. Исторический опыт и современное состояние // Сборник материалов XIII Регионального творческого форума с международным участием «Архитектурные сезоны в СПбГАСУ». Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. С. 122–123.
2. Сазыкина Е.В. Пути развития современного производства России и их влияние на практику архитектурного проектирования // Architecture and modern information technologies. 2016. №1(34). С. 1–10.
3. Дмитриева А.О., Хрусталев А.А. Функциональное зонирование и архитектурные решения современных производственных предприятий // Системные технологии. 2019. №2(32). С. 103–111.
4. Сазыкина Е.В. Особенности архитектурно-планировочной организации производственных предприятий в условиях современного

города // Архитектура и современные информационные технологии. 2017. №1(38). С. 213–224.

5. Ramaraj A., Nagammal J. Exploring the 'r's and constructing the big picture of 'recycling' in architecture and construction industry // A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture. 2021. Т. 18. № 1. С. 153–169.

6. Muller J. The Architecture of Waste Designing New Avenues for Public Engagement with Trash // Ri-vista. 2018. 01. 36–52. Систем. Требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/228596475.pdf> (дата обращения: 03.03.2023)

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

8. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management // «Harvard Design Magazine». 2015. Pp. 40.

9. Супранович В.М., Сафронова А.Д. Принципы формирования архитектурно-художественного облика зданий мусоросортировочных станций в контексте городской среды // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 12. С. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-75-85

10. Супранович В.М., Сафронова А.Д. Тенденции формообразования мусороперерабатывающих объектов. Основные направления и их влияние на архитектуру МПО // Вестник БГТУ им.

В.Г. Шухова. 2023. № 3. С. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110

11. Рывкин М.Д. Бытовой мусор и мегаполис: проблемы утилизации // Твердые бытовые отходы. 2007. № 5 (11). С. 22–23.

12. Рыжих Ю.С. Проблема утилизации бытовых отходов // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 10. С. 125–128.

13. Рожков Р.С. Совершенствование системы мотивации в области сортировки бытовых отходов // Инновации. Наука. Образование. 2020. №17. С. 261–265.

14. Ляпунов К. Как в России обращались с отходами. – 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/04/10/musor/> (дата обращения: 04.04.2023)

15. История мусора российского в двух частях. Часть первая от Рюрика до Екатерины Великой. 2023 [Электронный ресурс] URL: <https://ecologyofrussia.ru/stories/istoriya-musora-1/> (Дата обращения: 11.04.2023)

16. История мусора российского в двух частях. Часть вторая: XIX – XX вв. 2023 [Электронный ресурс] URL: <https://ecologyofrussia.ru/stories/istoriya-musora-rossiyskogo-chast-vtoraya/> (Дата обращения: 11.04.2023)

17. Мусороперерабатывающие заводы вокруг Москвы. Справка. 2023 [Электронный ресурс] URL: <https://ria.ru/20100521/236957620.html> (Дата обращения: 12.04.2023)

Информация об авторах

Супранович Валерия Михайловна, кандидат архитектуры, архитектурный факультет, кафедра архитектурного проектирования. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 17.08.2023 г.

© Супранович В.М., 2023

Supranovich V.M.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: vmsupranovich@gmail.com

FEATURES OF URBAN PLANNING LOCATION OF EXISTING OBJECTS OF WASTE SORTING AND WASTE PROCESSING IN RUSSIA

Abstract. The article presents the materials of the research “Features of urban placement of existing waste sorting and waste processing facilities in Russia”. The data of a comprehensive analysis of the historical stages of waste management in the country and, as a result, the formation of a practice for the creation of waste management facilities are presented. The existing objects of waste incineration plants, as well as waste processing complexes, which are expected to be built throughout the country in the future, are studied. The analysis of town-planning characteristics of domestic productions is carried out. Graphic schemes for the placement of waste management facilities have been developed in accordance with the profile of the enterprise (incineration or sorting-processing). The features of their location are revealed: the isolation of enterprises, regardless of the location (inside or outside the city boundaries), the dependence of areal characteristics and the shape of the site on the purpose of production, the compositional solution of the general plan of the territory

and the organization of transport accessibility of objects. An assessment is given of the further development of waste sorting and waste processing enterprises in Russia, taking into account global trends in the development of "sustainable architecture" of industrial buildings. The data are published based on the results of the research work "Principles of urban planning and architectural and planning organization of waste sorting and waste processing facilities in Russia", as part of the competition for grants for research work by scientific and pedagogical workers of SPbGASU in 2023.

Keywords: industrial architecture, urban planning, waste sorting facilities, waste processing facilities, sustainable development, Russia.

REFERENCES

1. Supranovich V.M. Architecture of waste processing facilities in Russia. Historical experience and current state [Arhitektura ob"ektov musoropere-rabotki v Rossii. Istoricheskij opyt i sovremennoe sostoyanie]. Collection of materials of the XIII Regional creative forum with international participation "Architectural seasons in SPbGASU". St. Petersburg: SPbGASU, 2023. Pp. 122–123. (rus)
2. Sazykina E. Development path of contemporary manufacturing and their impact on practice in the architectural design [Puti razvitiya sovremen-nogo proizvodstva rissii i ih vliyanie na praktiku arhitekturnogo proektirovaniya] Architecture and modern information technologies. 2016. No. 1(34). Pp. 1–10. (rus)
3. Dmitrieva A., Khrustalev A. Functional zoning and architectural design of contemporary industrial facilities [Funktsionalnoe zonirovanie i arhitekturnye resheniya sovremennykh proizvodstvennykh predpriyatiy]. The system technologies. 2019. No. 2 (No. 32). Pp. 103–111. (rus)
4. Sazykina E. Architectural and planning organization features of industrial facilities in the contemporary urban structures [Osobennosti arhitekturno planirovochnoy organizatsii proizvodstvennykh predpriyatiy v usloviakh sovremennogo goroda]. Architecture and modern information technologies. 2017. No. 1 (38). Pp. 213–224. (rus)
5. Ramaraj A., Nagammal J. Exploring the 'r's and constructing the big picture of 'recycling' in architecture and construction industry. A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture. 2021. Vol.18. No. 1. Pp. 153–169.
6. Muller J. The Architecture of Waste Designing New Avenues for Public Engagement with Trash. Ri-vista. 2018. No. 1. Pp. 36–52. AdobeAcrobatReader. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/228596475.pdf> (date of treatment: 03.03.2023)
7. Shamaeva T.V. Sustainable development of the architectural appearance of industrial facilities on the example of foreign experience [Ustojchivoe razvitie arhitekturnogo oblika promyshlennykh ob"ektov na primere zarubezhnogo opyta]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61 (rus)
8. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management. «Harvard Design Magazine». 2015. Pp. 40–47.
9. Supranovich V.M., Safronova A.D. Principles of formation of architectural and shape of waste sorting plant in the context of the urban environment [Principy formirovaniya arhitekturno-hudozhestvennogo oblika zdaniy musorosortirovochnykh stancij v kontekste gorodskoj sredy]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110 (rus)
10. Supranovich V.M., Safronova A.D. Shaping trends of waste recycling objects. Main directions and their impact on WRO architecture [Tendencii formoobrazovaniya musoropererabatyvayushchih ob"ektov. Osnovnye napravleniya i ih vliyanie na arhitekturu MPO]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2023. No. 3. Pp. 97–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-97-110 (rus)
11. Rivkin M.D. Household waste and megacity: problems of recycling. [Bytovoj musor i megapolis: problemy utilizacii]. Municipal Solid Waste magazine. 2007. No. 5 (11). Pp. 2–23. (rus)
12. Ryzhikh Yu.S. The problem of disposal of domestic waste. [Problema utilizacii bytovykh othodov]. Sustainable development of science and education. 2019. No. 10. Pp. 125–128. (rus)
13. Rogkov R.S. Improving the incentive system for household waste sorting. [Sovershenstvovanie sistemy motivacii v oblasti sortirovki bytovykh othodov]. Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2020. No. 17. Pp. 261–265. (rus)
14. Lyapunov K. How waste was treated in Russia. [Kak v Rossii obrashchalis' s othodami] 2020. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/04/10/musor/> (date of treatment: 04.04.2023)
15. The history of Russian garbage in two parts. Part one from Rurik to Catherine the Great. [The history of Russian garbage in two parts. Part one from Rurik to Catherine the Great] 2023. URL: <https://ecologyofrussia.ru/stories/istoriya-musora-1/> (date of treatment: 11.04.2023)
16. The history of Russian garbage in two parts. Part two: XIX–XX centuries. [The history of Russian garbage in two parts. Part two: XIX–XX

centuries] 2023. URL: <https://ecologyofrussia.ru/stories/istoriya-musora-rossiyskogo-chast-vtoraya/> (date of treatment: 11.04.2023)

17. Waste processing plants around Moscow. Reference. [Waste processing plants around Moscow. Reference] 2023. URL: <https://ria.ru/20100521/236957620.html> (date of treatment: 12.04.2023)

Information about the authors

Supranovich, Valeriia M. PhD, Assistant professor. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, Saint Petersburg, st. Vtoraya Krasnoarmeiskaya 4

Received 17.08.2023

Для цитирования:

Супранович В.М. Особенности градостроительного размещения существующих объектов мусоросортировки и мусоропереработки в России // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 68–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77

For citation:

Supranovich V.M. Features of urban planning location of existing objects of waste sorting and waste processing in Russia. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 68–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-68-77

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-78-84

Славина Т.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: asp.kea2020@yandex.ru.

ПРОЕКТНЫЙ ЧЕРТЕЖ – РЕВОЛЮЦИЯ В РУССКОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Аннотация. Искусство проектного черчения восходит к античности. Русская архитектура не знала проектного чертежа: церковники допетровской России сопротивлялись чертежному проектированию; иная ситуация сложилась, когда строительное дело взял в свои руки самодержец. Петр I познакомился с проектным черчением в Англии во время Великого посольства. Монаршей властью он ввел в практику проектный чертеж в России, вместе с понятиями «архитектура, план, фасад, пропорция, масштаб, перспектива», а также с атрибутами профессии – чертежной бумагой, рейсфедером, циркулем и пр. Архитектор новой формации стал рисовать и чертить. В статье рассмотрено значение проектного чертежа в творческом процессе: разделение проектирования и строительства, возможность уточнять замысел эскизом, тиражирование проекта («образцовое проектирование») и пр. Проектный чертеж оказал столь радикальное влияние на развитие русской архитектуры, что мы вправе расценивать его появление как исторический перелом в профессии «архитектор» и как начало профессии «градостроитель». Изменились методы архитектурного образования. Особенно важен проектный чертеж в градостроительстве: генеральный план города дал возможность моделировать его структуру и композицию и реализовать петровскую идею регулярности.

Ключевые слова: профессиональная культура, проект, генеральный план, образцовое проектирование, архитектурное образование.

Введение. Петр Алексеевич Романов первым из русских царей путешествовал по странам Западной Европы – в 1697–1698 и в 1716–1717 годах. Руководило им не праздное любопытство. Действо по поиску, захвату и переносу знания: так оценивают сегодня ученые цель, смысл и результат этих путешествий [1]. Одним из компонентов «захваченного» знания стало понятие АРХИТЕКТУРА: это слово впервые прозвучало в лексиконе Петра и Феофана Грека [2]. Слово «архитектор» перестало быть синонимом «фряжина»: «Самое имя архитекторам гречески, а российски – главной строителю имянуется», – с гордостью сообщали современникам мастера новой формации [3].

Новым знанием-умением явился архитектурный проектный чертеж.

Петр, возможно, заинтересовался корабельными чертежами в юности, на Преображенской верфи, где ему помогали строить корабли голландские мастера. Во время первого путешествия в Европу, вошедшего в историю как Великое посольство, Петр среди многих прочих дел имел и еще одну задачу – изучить проектное дело. Проект он называл «чертежом» или «пропорцией».

Проектное черчение Петр постиг не в Голландии, а в Англии [4]. Корабельная архитектура в те годы была частью «архитектуры цивилис и милитарис». По возвращении на родину Петр делает проектирование обязательным технологическим компонентом архитектурного процесса.

Методология. В статье используется сравнительный метод: сравнение профессии «архитектор» в отдаленные друг от друга и близкие исторические эпохи дает ключ к пониманию генезиса и особенностей русской архитектуры нового времени.

Основная часть. Искусство проектного черчения восходит к античности. Пройдя через культуру Византии и готической эпохи, оно стало неотъемлемой частью профессионализма в эпоху Возрождения: итальянские мастера к началу XVI века уже владели полноценным инструментарием проектирования, включающем чертежи – триаду плоских проекций «план – фасад – разрез» и перспективу, а также детальную архитектурную модель [5].

Русская архитектура не знала проектного чертежа: церковники допетровской России сопротивлялись чертежному проектированию; иная ситуация сложилась, когда строительное дело взял в свои руки самодержец. Петр внедряет новое искусство монаршей волей: «...уставы и всякие законы, от Самодержцев в народ исходящие, у подданных послушания себе не просят аки бы свободного, но истязуют яко должного» [6]. От запрещает строить «против указу и без чертежа архитектурного»; указом 1715 года Петр сурово угрожает обер-комиссару столицы князю А. М. Черкасскому: «А ежели ты не будешь сего смотреть <...> то жестоко будешь наказан. Тож и Архитекторам следовать будет, ежели они без нашего указа учинят» [7]. Работать с чертежами-образцами он учит своих «архитектурных подмастерьев»: приступая к устройству

Петергофа и Летнего сада, приказывает Михаилу Земцову скопировать чертежи из трактата Леклерка, изданного в Париже в 1714 году, и какие-то чертежи, присланные из Франции [8] «Каскаду большую, что против пруда, надлежит сделать во всем препорциею против каскады Марлинской. <...> Оную препорцию можно сыскать из книги писаной, а не печатной, которых две у меня в Летнем доме», – требует он [9].

Значение нововведения было огромным. Проектный чертеж оказал столь радикальное влияние на развитие русской архитектуры, что мы вправе расценивать его появление как исторический перелом в профессии «архитектор» и как начало профессии «градостроитель».

Впервые русский язык принял слова проект, план, фасад, пропорция, масштаб, перспектива, с ними в обиход вошли листы чертежной бумаги, рейсфедеры, циркули и другие атрибуты профессиональной работы.

С введением проектного чертежа в России кардинально изменился характер деятельности зодчего. Средневековый мастер каменных дел проектировал «в голове»; теперь же назначение формы объекта, его размеров, пропорций и прочего происходит на бумажном листе.

Архитектор новой формации начал рисовать. В процессе рисования реализуется таинственная связь между рукой и сознанием [10]; значит, набор визуальных образов, привлекаемых архитектором в процессе творчества, бесконечно расширяется.

Кроме того, в творческом процессе появился новый элемент: эскиз проекта.

Эскиз дает возможность проверять-корректировать идею, отрабатывать варианты – замысел приобретает законченную форму.

Изменился характер взаимодействия архитектора с заказчиком: последний получает возможность «увидеть» будущую постройку, а затем согласиться с архитектором или внести поправки в проект. Следовательно, выбор проектного решения становится более обоснованным, нежели в Средневековье, когда мастер и хозяин договаривались на словах.

Проектный чертеж открыл русским геометрию – волшебную игру линий и фигур, входящую в искусство архитектуры.

На чертеже моделируется конструкция: это особенно важно при проектировании типологически новых объектов, к строительству которых мастера каменных дел или плотники не имели навыков. Так, весьма точное представление о конструкциях дает проект сооружений Ладожского канала, начатого Петром I вместе с Минином [11].

Далее. Проект может быть реализован строителем без участия архитектора.

Творческий этап теперь может быть отчужден от процесса строительства. Это означало начало разделения и разумной специализации профессий архитектора и строителя (это произойдет еще не скоро, но архитектор надолго сохранит за собой право «авторского надзора» за идентичностью чертежа и постройки).

Проект, вычерченный на бумаге, открывал невиданные возможности широкого печатного воспроизведения замысла (на этом основано «образцовое» проектирование), т.е. тиражирования удачных строений, ранее существовавших в единственном числе.

В Средневековье кончина зодчего означала гибель замысла, теперь же замысел мог быть с успехом завершен преемниками мастера.

Введение проектного чертежа изменило характер взаимодействия русской архитектуры и мирового наследия. В средневековье знания о европейской архитектуре приходили на Русь эпизодически – или с приездом иностранцев (например, «фрязинов» – итальянских мастеров, работавших в Московии в XV–XVI вв.), или в виде архитектурной книги с иллюстрациями, изображающими ордера, виды разные городов и разные типы зданий; таких книг было немного. При Петре стали издавать пособия по архитектуре, а также переводы трактатов Виньоля, Палладио и других мастеров Возрождения. Теперь архитектурная библиотека становится подспорьем архитектора: на его рабочем столе есть архитектурный увраж, он стер границы, установленные преемственным цеховым методом, расширил арсенал архетипов, приемов, форм, осваиваемых русскими зодчими.

Петр Алексеевич проектировал сам: давно доказано прямое авторство Петра в начертании абриса городских и парковых планировок и построек в Петербурге, Стрельне, Петергофе. Ему нужны были помощники. По приказу царя А. П. Измайлов, дипломат при датском дворе, 1 апреля 1703 года заключил контракт со швейцарцем Доменико Трезини, «архитектонским начальником цивилии и милитарии», опытным «в городском и палатном строении». «За художества его, совершенное искусство, обещаю ему 20 червонных на всяк месяц в жалованье», – гласил договор. Трезини надолго стал помощником царя, единственным профессионалом, владеющим проектным методом.

Приглашение дорогостоящих иностранных специалистов – неизбежная, но временная необходимость. Следовало готовить отечественных профессионалов, и в контракты с иностранцами включается пункт, обязывающий их иметь учеников. Дело в этих «командах» было налажено не лучшим образом: до наших дней дошли сведения о конфликтах между учителями и учениками,

о злоупотреблениях первых и горестях вторых; к тому же быт в строящемся Петербурге был далек от привычного, иностранцы болели и умирали либо старались побыстрее покинуть суровую страну. Только Доменико Трезини обстоятельно выполнил поставленное императором условие: он имел нескольких учеников «у науки архитектурного художества и у дела чертежей и размерения мест на Васильевском острове» [12]. Будущих помощников следовало сначала обучить грамоте, и Петр много сделал для светского образования: открыл цифирные школы, призванные «детей всякого чина учить грамоте, цифири и геометрии», и несколько профессиональных училищ.

Наконец, указом от 2 марта 1716 года Петр приказал своему просвещенному соратнику контр-адмиралу Конону Зотову подобрать двадцать человек дворянских детей не моложе семнадцати лет и отправить их для обучения за границу. Деятельное участие в выборе недорослей принимал и сам царь, знавший некоторых абитуриентов еще по Москве. В 1716 году отправили не двадцать, а пятьдесят юношей. Учиться архитектуре цивилис и милитарис были назначены И. К. Коробов, И. А. Мордвинов, П. М. Еропкин, М. Д. Башмаков, И. Ф. Мичурин, Т. Н. Усов, Ф. М. Исаков, П. Колычев: одни уехали в Голландию, другие в Италию. До поры наладили обучение дома: школу при Канцелярии от строений возглавил Михаил Земцов, первый русский архитектор новой формации, прошедший обучение у Трезини, Микетти, Леблони (по приказу царя он выучил итальянский язык и служил у них толмачом, а затем, сдав экзамен, получил звание архитектора).

В градостроительстве проектный чертеж произвел еще более радикальный переворот, чем в проектировании и строительстве отдельных зданий; школой этого искусства, неведомого на Руси, стал только что основанный Петербург.

Градостроительные чертежи, с которыми Петр познакомился в Европе, показали ему две вещи: во-первых, метод подготовки к преобразованию территорий посредством нанесения на чертеж очертаний будущих построек, дорог и пр., изображаемых топографическими символами; во-вторых – обаяние и силу «регулярных», геометрически правильных линий и фигур.

Будущей столице следовало дать форму. Априорная идея города – вещь недоказуемая; но целенаправленная последовательность при создании новой столицы свидетельствует, что такая идея – или мечта – у Петра была, он дал ей имя парадиз – рай; Образ ее складывался еще во

время Великого посольства: он увидел города, в которых средневековая стихия отступала под влиянием градостроительных правил Возрождения и барокко.

В Голландии его внимание привлекли каналы, прорезающие города, прямоугольные кварталы, тесно стоящие дома, образующие сплошной фронт прямых улиц, и регулярные сады. В 1698 году Петр провел несколько месяцев в Англии, где с начала XVII века, с творчеством Иниго Джонса, расцветала классицистическая концепция архитектуры, основанная на учении Андреа Палладио. За двадцать два года до приезда Петра центральная часть Лондона погибла в Великом пожаре, и царь мог видеть результаты реконструкции столицы по проекту Кристофера Рена. Он посетил и Гринвич, где уже строит великолепный ансамбль Морского госпиталя.

Совокупный образ правильно организованного пространства, который Петр I вывез из Европы, был сильнее и богаче реальных городов, виденных Петром, и противоречил отечественному опыту: если не считать маленькой Немецкой слободы, русское градостроительство не знало ни геометрических городских пространств, ни прямизны «прошпектов». Замыслить такой город Петру Алексеевичу позволило развитое эстетическое чутье. Его вело врожденное чувство прекрасного, и не случайно одним из первых и любимых петербургских детищ царя стал Летний сад. (рис. 1).

Петру нравилась «регулярность»: еще подростком он, строя слободу для солдат своего Преображенского полка, он дал ей правильную планировку с одинаковыми размерами участков. Монаршая воля сообщила его чувству силу вектора градостроительной политики.

После Полтавской победы Петр всерьез занялся новым городом. 1712–1715 годы исполнены своеобразного драматизма: царь мечется, придумывая, а затем отменяя варианты размещения центра [13]. Свои замыслы Петр проверяет, заказывая французским и немецким картографам генеральные планы столицы, на которых существующая застройка совмещена с вариантами новых регулярных градостроительных решений.

«Лоскутность» города тревожила Петра. Специалистов категорически не хватало, он обязал русских дипломатов искать новых архитекторов, и те приглашают мастеров из Германии, Италии, Франции. В 1713–1725 годах в новой столице проектируют, не считая Д. Трезини, одиннадцать иностранцев; как правило, они живут здесь не подолгу. (рис. 2, 3)

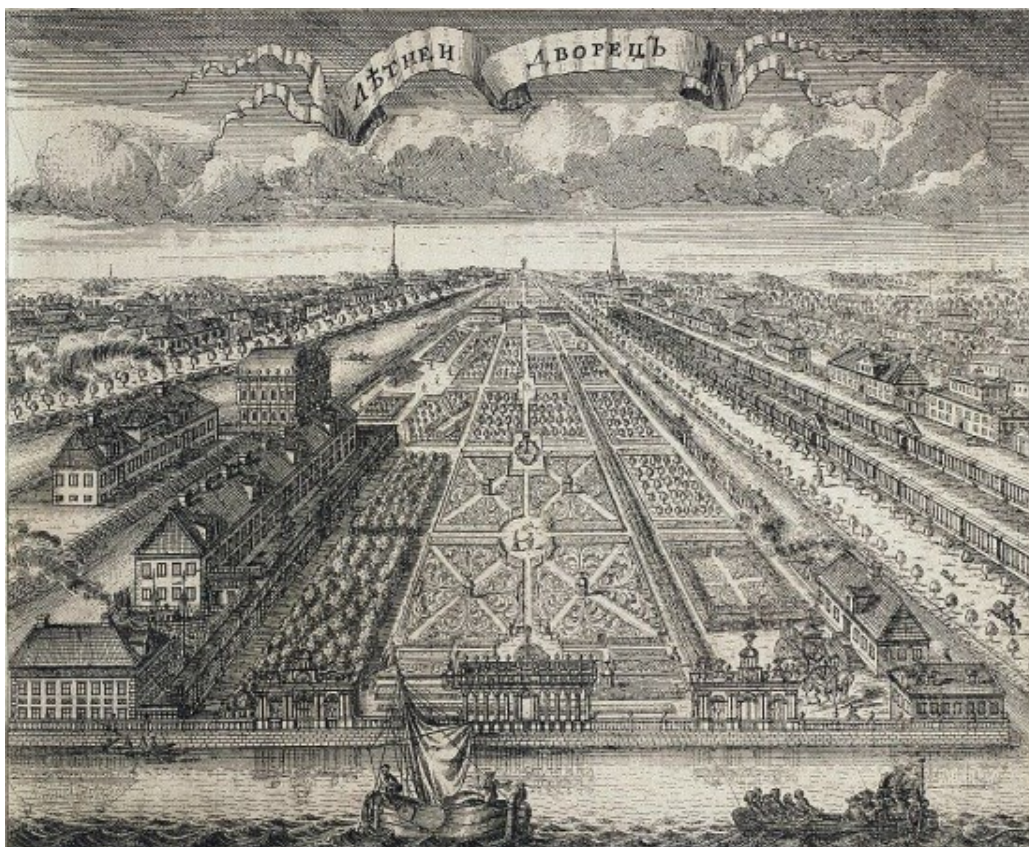


Рис. 1 Один из первых опытов «регулярной» организации пространства Летний сад и Летний дворец. Гравюра Алексея Зубова. 1716.

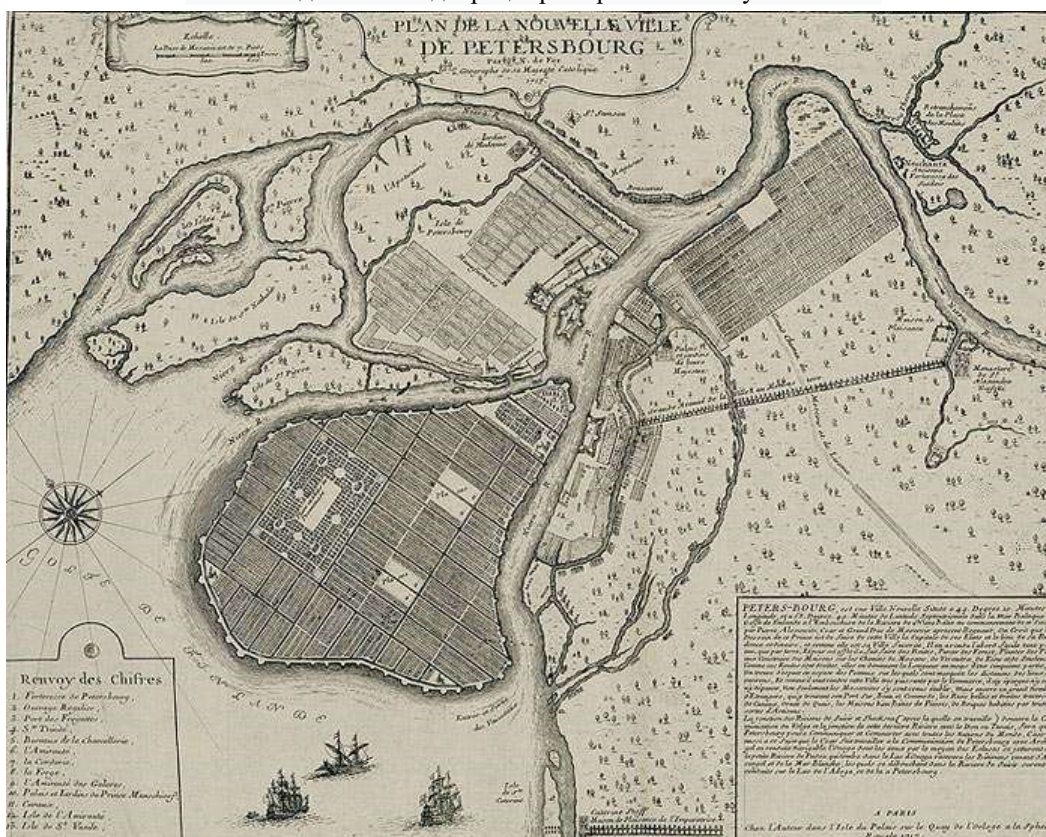


Рис. 2 Один из первых опытов совмещения фиксационного и проектных планов Петербурга. Николя де Фер. Гравированный план Санкт-Петербурга. 1717. Де Фер чертил план по указаниям Петра I, находившегося тогда в Париже. Воспроизведен план Васильевского острова (Д. Трезини, 1716). Зафиксирована линия просеки, проложенной Петром в 1713 году от Адмиралтейства к только что основанному Александро-Невскому монастырю. Намечена регулярная планировка Московской слободы и Городового острова

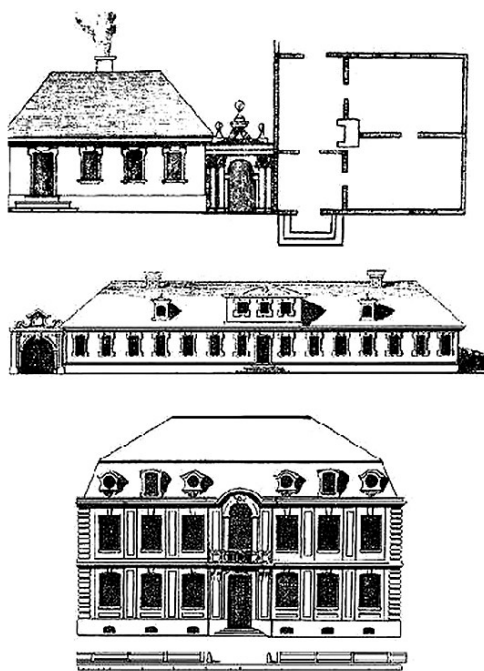


Рис. 3. Первые образцовые проекты. Д. Трезини: Дом для подлых, дом для именитых, дом для зело именитых

Самой яркой фигурой среди них был Жан-Батист Леблон, архитектор, инженер, специалист по устройству парков. Контракт с Леблоном был подписан 19 февраля 1716 года. По дороге в Петербург Леблон остановился в Пирмонте, бальнеологическом курорте, и был представлен царю, лечившемуся там. Они провели вместе две недели, обсуждали строительные планы, осмотрели резиденции в Ганновере и Шверине (ансамбль Херренхаузен в Ганновере стал прототипом будущей Стрельны) [14].

Самым значительным вкладом Леблона в русскую культуру стал генеральный план Петербурга. В письме Петра I Меншикову от 22 июня (3 июля) 1716 года есть знаменательная фраза: Леблону поручается исправить в Санкт-Петербурге то, «что еще можно исправить» [15]. Можно истолковать эти слова так: следовало устранить стихийность города, еще столь далекого от образа «парадиза».

Леблон завершил проект 8 января 1717 года и отослал его царю в Голландию. Проект изображал компактный овальный город, центром которого служит пространство Невы, связанное уже созданными Петром доминантами – крепостью с Петропавловским собором, Адмиралтейством, стрелкой Васильевского острова. Городская (в будущем Петроградская) сторона и Васильевский остров представлены Леблоном как совокупность гармонически уравновешенных ансамблей с площадями, парками, набережными, променадами и крупными градообразующими зда-

ниями: так, на Васильевском острове расположены Академия изящных искусств и ремесел, царский дворец, ратуша, Сенат.

Генеральный план Леблон дополнил трактатом о градостроительстве – «Запиской на предмет генеральной диспозиции проектов, созданных для возведения города Санкт-Петербурга». Через двадцать лет Б.-Х.Миних и вернувшиеся из-за границы петровские пенсионеры используют идеи Леблона в трактате «Должность архитектурной экспедиции».

Проект не мог быть осуществлен: он игнорировал наметившуюся тенденцию развития города к югу; цепь укреплений, окружающих город, уже не имела особого смысла. Но это неважно: Петр понял и оценил метод искусства градообразования, показанный Леблоном. Следующие проектные планы Петербурга свидетельствуют о поисках, которые вел царь-градостроитель, следуя этому методу. Намечена регулярная застройка Петроградской стороны и Литейной части. Оценив красоту открывшейся Невской перспективы (это слово прозвучало впервые), и, возможно, находясь под впечатлением версальского трехлучия (в 1717 году Петр I побывал во Франции). Петр начинает разрабатывать идею веерной композиции Адмиралтейской стороны: по его приказу сначала Г. Маттарнови рисует десять лучей, сходящихся к Адмиралтейству (1718), а в конце 1719 года впервые появляется петербургское пятилучие. Схему последнего начертил Н.-Ф. Гербель: на башню Адмиралтейства ориентированы три «перспективы» (Невская, Средняя и Вознесенская), а также будущие Миллионная и Галерная улицы.

Яркой новацией стала предписанная петровским указом 1714 года и закрепившаяся на два с половиной столетия застройка улиц «сплошным фасадом» (внедренная вопреки Леблону, предпочитавшему ставить особняки в саду в глубине участка).

К 1725 году Петербург являл собой как бы эскиз углем на полотне, наметивший главные элементы будущей картины. В последующие два с лишним столетия северная столица, развиваясь в алгоритме, заданном Преобразователем, стала прекраснейшим ансамблем, самым крупным из городов, признанных ЮНЕСКО объектами культурного значения мирового класса.

Преемники и последователи Преобразователя – Б.-Х.Миних, Ф.-Б.Растрелли, звездные архитекторы Екатерины II и Александра I развили и упрочили ее. Что же касается профессиональной культуры, заложенной Петром I, то его. Создателем и хранителем профессионализма стала петербургская Академия художеств, где учили

прежде всего умению рисовать и чертить. Но это уже другая история.

Выводы. Введенное Петром 1 чертежное проектирование – важнейший классификационный признак профессии «архитектор», позволяющий разделить русское Средневековье и Новое время как по типу творчества зодчих, так и по характеру архитектуры. Особую роль сыграл проектный чертеж в градостроительстве и в архитектурном образовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гузевич Д.Ю., Гузевич И.Д. Великое посольство. Рубеж эпох, или Начало пути. 1697–1698. СПб.: Дмитрий Буланин, 2008. 693 с.
2. Фасмер М. Этимологический словарь русского языка. [Электронный ресурс]. URL: <https://gufo.me/dict/vasmer>. (дата обращения 10.09.2023)
3. Должность архитектурной Экспедиции // Архитектурный архив. 1946. Вып. 1. М: Издательство Академии архитектуры СССР. 143 с.
4. Ревзина Ю.Е. Инструментарий проекта. От Альберти до Скамоцци. М.: Памятники исторической мысли, 2003. 156 с.
5. Прокопович Ф. Правда воли монаршей во определение наследника державы своей. 1722. [Электронный ресурс]. <http://музейреформ.рф/node/13642> (дата обращения 10.09.2023)
6. Полное собрание законов Российской империи (ПСЗРИ), собр. 1, т. V, № 2932. [Электронный ресурс]. https://nlr.ru/eres/law_r/search.php?part=24®im=3 (дата обращения 10.09.2023)
7. Иогансен М.В. Михаил Земцов. Л.: Лениздат, 1975. С. 142.
8. Микишатъев М. Н. Ранний памятник петровской эпохи // в кн.: Проблемы синтеза искусств и архитектуры / темат. сб. трудов Ин-та живописи, скульптуры и архитектуры им. И. Е. Репина. Л., 1983. 18 с.
9. Хьюитт М.-А. 12 способов реформирования архитектурного образования. [Электронный ресурс]. URL: https://commonedge.org/12-ways-to-reform-architectural-education/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com (дата обращения 10.09.2023)
10. Лермонтова М. А. Староладожский канал. История строительства и архитектура зданий и сооружений: дис. ... канд. искусствоведения. СПб., 1998.
11. Лисевич И.И. Первый архитектор Петербурга. Л.: Лениздат, 1971. 103 с.
12. Семенов С.В. Градостроительное развитие Санкт-Петербурга в 1703–2000-е годы: автореф. дис. ... д-ра archit. СПб., 2007.
13. Гузевич Д.Ю., Гузевич И.Д. «Леблон Жан-Батист Александр». В книге: «Иностранные специалисты в России в эпоху Петра Великого», Изд. Ломоносовъ, 2019. 800 с.
14. Петров П.Н. История Санкт-Петербурга от основания города. СПб., 1884. 782 с.

Информация об авторах

Славина Татьяна Андреевна, доктор архитектуры, профессор, академик РААСН, профессор-консультант. E-mail: asp.kea2020@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 11.09.2023 г.

© Славина Т.А., 2023

Slavina T.A.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: asp.kea2020@yandex.ru

DESIGN DRAWING – A REVOLUTION IN RUSSIAN ARCHITECTURE

Abstract. The art of design drawing dates back to canticism. Russian architecture did not know design drawings: the clergy of pre-Petrine Russia resisted design drawings; A different situation arose when the autocrat took the construction business into his own hands. Peter I became acquainted with design drawing in England during the Great Embassy. By royal power, he introduced design drawing into practice in Russia, along with the concepts of “architectural tour, plan, facade, proportion, scale, perspective,” as well as with the attributes of the profession – drawing paper, drawing board, compass, etc. Architect of a new formation began to draw and draw. The article examines the importance of a design drawing in the creative process: the separation of design and construction, the ability to clarify plans with a sketch, replication of a project (“model design”), etc. The design drawing had such a radical impact on the development of Russian architecture, that we have the right to regard its appearance as a historical turning point in the profession of “architect” and

as the beginning of the profession of “urban planner”. Methods of architectural education have changed. The design drawing is especially important in urban planning: the general plan of the city made it possible to model its structure and composition and implement Peter’s idea of regularity.

Keywords: professional culture, project, master plan, exemplary design, architectural education.

REFERENCES

1. Guzevich D.Yu., Guzevich I.D. Grand Embassy. The turn of eras, or the beginning of the journey. 1697–1698 [Velikoe posol'stvo. Rubezh epoch, ili Nachalo puti. 1697–1698]. SPb.: Dmitriy Bulanin, 2008. 693 p.
2. Fasmer M. Etymological dictionary of the Russian language [Etimologicheskii slovar' Russkogo yazyka]. URL: <https://gufo.me/dict/vasmer>.
3. Architectural expedition position [Dolzhnost' arkhitekturnoy ekspeditsii] Arkhitekturnyi arhiv. 1946. Vol. 1. 143 p.
4. Revzina Yu.E. Project tools. From Alberti to Scamozzi [Instrumentarii proekta. Ot Al'berti do Scamocci]. Moscow.: Pamyatniki istoricheskoy misli. 2003. 156 p.
5. Prokopovich F. The truth of the will of the monarch in determining the heir to her power [Pravda voli monarshey vo opredeleniye naslednika derzhavy svoey]. 1722.
6. Complete collection of laws of the Russian Empire [Polnoye sobraniye zakonov Rossiyskoy imperii]. Sobr. 1., Vol. V, No. 2932 https://nlr.ru/res/law_r/search.php?part=24®im=3
7. Iogansen M.V. Mikhail Zemcov [Mihail Zemcov]. L.: Lenizdat, 1975. 142 p.
8. Mikishatiev M.N. Early monument of the Peter the Great era [Ranniy pamyatnik petrovskoy epokhi]. Problemy sinteza iskusstv I arhitektury (tematicheskii sbornik trudov Instituta zhivopisi, skulptury I arhitektury im. I.E. Repina. L.: 1983. 18 p.
9. Hiutt M. -A. 12 ways to reform architectural education [12 sposobov reformirovaniya arkhitekturnogo obrazovaniya]. URL: https://commonedge.org/12-ways-to-reform-architectural-education/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com
10. Lermontova M.A. Staraya Ladoga Canal. History of construction and architecture of buildings and structures: dissertation of Candidate of History of Art. [Staroladozhskiy kanal. Istoriya stroitel'stva i arkhitektura zdaniy i sooruzheniy]. Spb., 1998.
11. Lisaevich I.I. The first architect of St. Petersburg [Pervyy arkhitekt Peterburga]. L.: Lenizdat, 1971. 103 p.
12. Sementsov S.V. Urban development of St. Petersburg in 1703–2000: abstract. dis. ... Dr. Archit. [Gradostroitel'noe razvitie Sankt-Peterburga v 1703 – 2000 gody]. Spb., 2007.
13. Guzevich D. Yu., Guzevich I.D. Leblond Jean-Baptiste Alexandre [Leblon jan-batist Aleksandr]. Inostrannye specialist v Rossii v epokhu Petra Velikogo. Izd.: Lomonosov, 2019. 800 p.
14. Petrov P.N. History of St. Petersburg from the founding of the city [Istoriya Sankt-Peterburga ot osnovaniya goroda]. SPb., 1884. 782 p.

Information about the authors

Slavina, Tatiana A. Doctor of Architecture, Professor, Academician of RAASN, Consulting Professor. E-mail: asp.kea2020@yandex.ru. Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4

Received 11.09.2023

Для цитирования:

Славина Т.А. Проектный чертеж – революция в русской архитектуре // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 78–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-78-84

For citation:

Slavina T.A. Design drawing – a revolution in Russian architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 78–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-78-84

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-85-92

*Коновалов В.М., Гостев Н.С., Федоров А.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

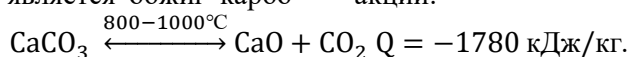
*E-mail: konovalov52@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Приводятся результаты анализа энергоэффективной технологии на примере получения строительной извести на модели шахтной печи. Представлен расчёт материального и теплового баланса шахтной печи для получения извести с использованием синтетического топлива, получаемого в процессе химической регенерации тепла вторичных энергетических ресурсов (ВТЭР). Экономия энергетических ресурсов и снижение технологических выбросов с меньшей концентрацией парниковых газов, является актуальной задачей, и предполагает развитие новых подходов к совершенствованию теплообменных процессов и повышения их энергетических возможностей. Вовлечение вторичных энергоресурсов (тепла охлаждаемой извести) в получении синтетического топлива – синтез-газа методом пароводяной и углекислотной конверсии натурального топлива, позволяет с одной стороны повысить интенсивность охлаждения продуктов обжига за счет высокого эндотермического эффекта реакции конверсии метана, а с другой стороны повысить жаропродуктивность получаемой смеси водорода и оксида углерода. Использование данной технологии позволяет снизить расход натурального топлива за счет вовлечения в процесс горения более 45 % воды в составе синтетического топлива, повысить коэффициент полезного действия установки и снизить на 19 % количество отходящих газов.

Ключевые слова: производство строительных материалов, технология химической регенерации тепла, обжиг извести, вяжущие вещества, экономия энергии.

Введение. Производство строительных материалов связано с большими энергетическими расходами. В производстве извести наиболее энергоёмким процессом является обжиг карбо-



Для разложения 1 кг карбоната кальция необходимо 1780 кДж или 0,5 мВтч/т [1], снизить энергозатраты можно при оптимизации и интенсификации технологических процессов [2].

К таким процессам можно отнести:

- повышение реакционной способности реагентов путем увеличения химической поверхности их взаимодействия и использование катализаторов, снижающих энергию активации процесса;
- аппаратурное оформление схем технологических процессов;
- повышение эффективности теплообменных процессов за счет изменения температурного фактора и повышения работоспособности теплоты вторичных ресурсов.

Рассматривая третью группу процессов, следует особое внимание уделить процессам регенеративного теплообмена, позволяющим получить значительную экономию натурального топлива.

В себестоимости производства извести топливо занимает более 50 % и в массовом выражении составляет в России на текущий период около 0,8 млн. т условного топлива в год. Использование конвертированного топлива будет

натной породы. Термическое разложение основного минерала сырья для получения извести – кальцита – протекает по стехиометрической реакции:

способствовать не только снижению расходов натурального топлива, но и расширит технологические возможности тепловых агрегатов, поскольку совмещает процессы регенерации тепла в холодильниках и процессах горения искусственного топлива в печи в зоне обжига [3, 4].

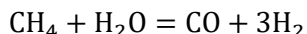
Под искусственным топливом подразумевается синтез-газ, состоящий преимущественно из диоксида углерода и водорода, получаемый в результате химической конверсии различных углеводородов и, помимо синтетического топлива, являющегося ценным сырьем химической промышленности для получения различного вида, моторных масел, топлив, пластмасс и аммиака.

Суть химической регенерации теплоты вторичных энергоресурсов заключается в использовании их теплосодержания для предварительной эндотермической переработки исходного топлива, которое при этом получает повышенное количество химически аккумулированной теплоты, а также подогревается.

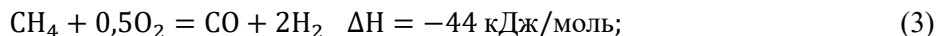
Существует принципиальная возможность конверсии любого вида органического топлива путем его разложения на водород и угарный газ – СО. Для протекания такой реакции, идущей со

значительным поглощением тепла, необходимо в реактор подать необходимое количество теплоты из рекуперативной зоны холодильника. В обычных холодильниках часть этой теплоты используется для подогрева вторичного воздуха. В данном устройстве часть ее аккумулируется в процессе эндотермического получения синтез газа. Исходное топливо нагревается до 700–800 °С и взаимодействует с водяным паром, который подается в реакционную зону. В этом случае в охладителе используется не только принцип конвективного охлаждения готового продукта – извести, но и принцип регенерации тепла в процессе физического испарения воды и протекания химической реакции разложения углеводородов при получении искусственного топлива.

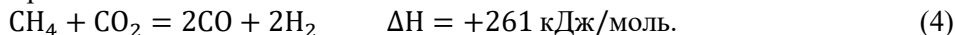
Учитывая специфические условия производства извести, наиболее подходящим топливом для ХРТ процесса следует рассматривать природный газ, состоящий преимущественно из метана с примесью более тяжелых углеводородов. Наиболее целесообразна в этом случае ХРТ методом пароводяной или углекислотной конверсии [5, 6]. В последнем случае предполагается использование в реакторе тепла и CO₂ отходящих из печи газов, что потребует более высокой температуры в реакторе для протекания процесса.



- парциальным окислением метана кислородом:



- углекислотной конверсией метана:



Комбинированием этих способов конверсии возможно получение различных по составу смесей угарного газа и водорода. Использование углекислотной конверсии представляется перспективным, поскольку позволяет использовать углекислый газ из отходящих газов, снижая его выброс в атмосферу [14].

Важным фактором энергоэффективности процессов термической обработки сырья в технологии строительных материалов особое внимание уделяется процессам рекуперации тепла в зоне охлаждения готового продукта. Холодильники различных конструкций выполняют двойственную функцию – быстрое охлаждение продуктов обжига, что препятствует процессам кристаллизации и фазовым переходам, ухудшающим качество продуктов и рекуперация тепла из зоны охлаждения в зону горения топлива, что повышает его эксергетические возможности.

Для шахтных газовых печей с удельным расходом тепла 4100–5900 кДж/кг извести, требуется воздуха на горение топлива 1,55–2,24 м³/кг извести соответственно. Таким количеством воз-

Метод ХРТ позволяет отвести от охлаждаемого объекта значительное количество теплоты, которая аккумулируется в результате протекания химической реакции разложения метана и образуется смесь угарного газа и водорода – синтез газ [7–9].

В результате паровой конверсии метана рекуперативная зона известковой печи предполагает охлаждение извести в слое от 1000–1200 °С воздухом, идущим далее на горение топлива. Как показали проведенные ранее исследования [3, 10, 11], реакция конверсии метана без катализатора достаточно полно протекает при обычном давлении в температурном интервале 800–1200 °С.

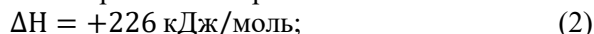
Применение технологии ХРТ в обжиге извести даёт возможность:

- получения больших объемов синтез-газа (смеси CO и H₂);
- увеличения жаропроизводительности топлива;
- резкого охлаждения извести.

Прием ХРТ пока не нашел применения в промышленности строительных материалов, но имеет большие перспективы [12, 13].

Получение синтез газа может реализовываться несколькими способами:

- паровой конверсией:



духа невозможно охладить известь до температуры ниже 100 °С. Именно этот фактор ограничивает тепловой к.п.д. шахтных и барабанных холодильников. Для охлаждения извести до 100 °С, следует подать в холодильник до 3,5 м³/кг извести. Но увеличение подачи воздуха в печь снижает температуру горения топлива и эффективность теплообмена в зоне обжига извести в том числе и за счет снижения температуры вторичного воздуха. Снижение теплового к.п.д. охладителя на 1 % ведет к увеличению расхода топлива на 0,5–0,7 кг условного топлива на тонну продукции. Указанные соотношения ограничивают эффективность конвективного теплообмена в существующих холодильниках и вынуждают искать более интенсивные способы охлаждения продуктов обжига.

Способ химической рекуперации тепла представляется наиболее рациональным решением. Изменение энтальпии исходных компонентов реакции (2) в процессе их подготовки – нагрева, испарения воды и дальнейший нагрев смеси водяных паров и метана в интервале температур 0 – 700 °С составит ΔH_{физ.} = 3,2 МДж/кг

смеси. Энтальпия химической реакции конверсии метана составляет $\Delta H_{\text{хим.}} = 6,6$ МДж/кг смеси. Полное потребление тепла в регенеративном процессе получения синтетического топлива составит 9,8 МДж/кг смеси. Столь высокое потребление энергии в результате конверсии природного топлива способствует эффективному охлаждению извести, сопоставимому к варианту охлаждения жидким водородом, что должно препятствовать рекристаллизационным процессам извести и получения быстро гасящегося продукта.

Возврат тепла в печь происходит за счет физического процесса нагревания вторичного воздуха и за счет ХРТ. При этом тепло, затраченное на протекание реакций конверсии, компенсируется повышением работоспособности нового синтетического топлива, за счет повышения на 200-300 °С его жаропродуктивности.

Выход синтез-газа и тепловой к.п.д. холодильника будет определяться особенностями конструкции реакционной камеры охладителя и выбранной схемы конверсии природного газа.

Материалы и методы. В расчетах использовался пример охлаждения клинкера методом ХРТ [3].

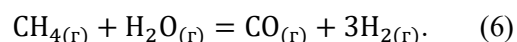
Расчёт проводился при:

- получении 1 кг извести активностью 100 %;
- обжигу подвергался 100 % карбонат кальция;
- в качестве топлива используется метан, теплота сгорания которого 35820 кДж/м³.

Для теоретического расчёта была смоделирована установка, позволяющая получить синтез-газ и использовать его в качестве топлива для обжига карбоната кальция. Гипотетическая установка представляет собой шахтную печь из кварцевой трубки-реактора, установленной в вертикальную печь, предназначенную для запуска реактора ХРТ на начальном этапе розжига. Внутри трубки находится карбонат кальция. К нижней части трубки подведены шланги, по которым подаются водяной пар и метан. Реактор условно разделен на три зоны: зона охлаждения, в которой происходит охлаждение извести и конверсия топлива; зона обжига извести, куда дополнительно подается воздух на горение синтез газа, и зона подогрева известняка, поступающего в реакционную зону [15].

Получение синтез газа осуществляется за счёт продувки метана и воды через слой извести, нагретого до 900-1100 °С. Количество реагентов и продуктов конверсии определяется из потребного расхода тепла на проведение реакции и исходного тепла извести из реакционной зоны печи. Степень превращения метана в синтез газ составляет 81 %.

Основная часть. Получение синтез-газа осуществлялось по реакции паровой конверсии метана:



Состав и характеристики Синтетического топлива приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав получаемого синтез газа

Показатели		CO	3H ₂	CH ₄
Плотность	m _г , кг/м ³	1,014	0,218	0,134
Удельный объем	V _г , м ³ /м ³	0,812	2,436	0,188
Содержание компонентов	φ, %об	74,23	15,96	9,81
	ω, %масс	23,63	70,90	5,47

Так, при взаимодействии 1 м³ метана и 0,652 кг водяного пара при температуре 1200 - 800 °С в реакцию конверсии вступает 81,21 % исходного метана, образуется 0,812 м³ угарного газа, 2,436 м³ водорода и остаётся 0,188 м³ метана [3]. Объём продуктов сгорания: 3,436 м³. Материальный баланс горения метана и синтез-газа, полученного из 1 м³ метана, приведен в таблице 2.

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = (126,3 * \text{CO} + 107,9 * \text{H}_2 + 358,2 * \text{CH}_4) * 3,436 = (126,3 * 23,63 + 107,9 * 70,90 + 358,2 * 5,47) * 3,436 = 43273 \text{ кДж/м}^3. \quad (9)$$

Жаропродуктивность синтеза газа:

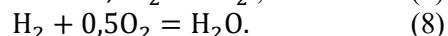
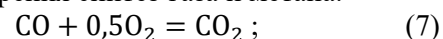
$$t_{\text{ж}} = 2196^\circ\text{C}, \quad (10)$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 358,2 * \text{CH}_4 = 358,2 * 100 = 35820 \text{ кДж/м}^3. \quad (12)$$

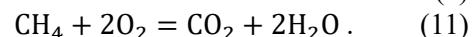
Жаропродуктивность метана:

$$t_{\text{ж}} = 2042^\circ\text{C}. \quad (13)$$

Расчёт горения синтез-газа и метана.



Низшая теплота сгорания 3,436 м³ синтез газа:



Низшая теплота сгорания 1 м³ метана:

Таблица 2

Материальный баланс горения 3,436 м³ синтез-газа и 1 м³ метана

Приходные статьи	Вид				Расходные статьи	Вид			
	На метане кг/м ³ ,	%	ХРТ, кг/м ³	%		На метане кг/м ³	%	ХРТ, кг/м ³	%
Топливо	0,714	5	0,714	4,8	CO ₂	1,977	14	1,977	13,3
Воздух	13,54	95	13,54	90,8	H ₂ O	1,61	11	2,264	15,2
H ₂ O _ж	0	0	0,65	4,4	N ₂	10,349	73	10,348	69,6
					O ₂	0,286	2	0,286	1,9
Итого	14,254	100	14,904	100	Итого	14,222	100	14,875	100

Скорость реакции разложения карбонатов и зависимость константы реакции от температуры выражается экспоненциальной зависимостью (уравнение Аррениуса), и даже незначительное увеличение температуры (на 20-30 °С), увеличивает скорость реакции в разы [16]. При оптимальном соотношении температуры в зоне декарбонизации и продолжительности пребывания в ней материала можно рассчитывать на увеличение производительности печи.

Из материального баланса горения топлива следует, что использование технологии ХРТ увеличивает количество продуктов сгорания на 0,65 кг/м³. Сравнительные материальный и тепловой балансы печи для обжига извести на природном газе и синтетическом топливе приведены в таблицах 3 и 4.

Из уравнений теплового баланса печи с использованием метана удельный расход топлива составляет $X_T = 0,121 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$, для печи с использованием технологии ХРТ удельный расход топлива составляет $X_T = 0,098 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Из материального баланса следует, что использование технологии ХРТ позволяет снизить расход топлива при получении извести на $0,016 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, снизить количество воздуха для сжигания топлива на $0,311 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, снизить количество отходящих газов на 19 % (углекислого на $0,045 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, азота на $0,238 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, кислорода на $0,007 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$).

Таблица 3

Материальный баланс печи на синтез-газе и метане

Приходные статьи	Вид				Расходные статьи	Вид			
	Метан, $\frac{\text{кг}}{\text{кг изв.}}$	%	ХРТ, $\frac{\text{кг}}{\text{кг изв.}}$	%		Метан, $\frac{\text{кг}}{\text{кг изв.}}$	%	ХРТ, $\frac{\text{кг}}{\text{кг изв.}}$	%
Топливо	0,086	2,45	0,070	2,16	Известь	1	19	1	30,83
CaCO ₃	1,786	50,88	1,786	55	CO ₂ ^T	0,239	9	0,194	5,98
Воздух	1,638	46,67	1,327	40,87	H ₂ O ^T	0,195	7	0,222	6,84
H ₂ O _ж	0	0	0,064	1,97	N ₂ ^T	1,252	49	1,014	31,26
					O ₂ ^T	0,035	1	0,028	0,86
					CO ₂ ^C	0,786	15	0,786	24,23
Итого	3,510	100	3,247	100	Итого	3,507	100	3,244	100

Таблица 4

Тепловой баланс печи с использованием технологии ХРТ и на метане

Приходные статьи теплоты	Вид				Расходные статьи теплоты	Вид			
	Метан, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг изв.}}$	%	Синтез-газ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг изв.}}$	%		Метан, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг изв.}}$	%	Синтез-газ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг изв.}}$	%
Топливо, теплота горения	4334	84,2	4241	85,3	Теплота на декарбонизацию	3179	61,7	3179	64,0
Топливо, физ. тепло	5	0,1	425	8,6	Теплота с отходящими газами	658	12,8	484	9,7
Известняк, физ. тепло	37	0,7	37	0,7	Потери на выходе из печи	803	15,6	803	16,2
Вторичный воздух	774	15	267	5,4	Потери через корпус печи	510	9,9	504	10,1
Итого	5150	100	4970	100	Итого	5150	100	4970	100

Из теплового баланса печи следует, что использование системы ХРТ позволяет снизить на 174 кДж/кг извести энергию потерь с отходя-

щими газами за счёт снижения количества отходящих газов и это без увеличения производительности печи и незначительно снизить потери через корпус на 6 кДж/кг.

Таблица 5

Тепловой баланс зоны охлаждения печи на метане и с использованием технологии ХРТ

Приходные статьи	Вид				Расходные статьи	Вид			
	Метан, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ изв.	%	Синтез-газ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ изв.	%		Метан, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ изв.	%	Синтез-газ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ изв.	%
Известь после печи	803	95	803	94,8	Известь после холодильника	71	8,4	71	8,4
Воздух	41	5	33	3,9	Втор. воздух	689	81,6	93	11
Метан	0	0	4	0,5	Синтез-газ	0	0	423	50
$H_2O_{ж}$	0	0	7	0,8	Потери через корпус хол-ка.	84	10	85	10
					Испарение воды	0	0	174	20,6
Итого	844	100	847	100	Итого	844	100	846	100

Тепловой баланса зоны охлаждения показывает, что использование технологии ХРТ снижает на 596 кДж/кг извести энергию вторичного воздуха, которая аккумулируется в получение синтез-газа и испарение воды. Тепловой баланс

$$\Delta Q_{\text{х.г.}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}}(\text{с.г.}) - Q_{\text{н}}^{\text{р}}(\text{CH}_4) = 43273 - 35820 = 7453 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}. \quad (14)$$

Термодинамический анализ показывает, что:

- Жаропроизводительность конвертированного топлива выше на 154 °С, чем жаропроизводительность метана, что повышает его эксергию.

- При конвертировании топлива возврат в печной агрегат химически аккумулированной теплоты составит - $\Delta Q_{\text{х.г.}} = 7453 \text{ кДж/м}^3$ метана.

- Уменьшаются величина необратимых потерь тепла через корпус, потерь с отходящими газами из печи.

Выводы. При конвертации исходного газового топлива в синтетический газ можно добиться снижения тепловых потерь с отходящими газами (174 кДж/кг), через корпус печи (6 кДж/кг). Химическая регенерация тепла и сжигание конвертированного топлива приводят к повышению производительности печи и экономии топлива (до 20 кг усл.топ./т извести). Более того, при сжигании конвертированного газа уменьшается на 19 % количество углекислого газа и азота в отходящих газах, снижается на 19 % расход воздуха на горение.

Высокое потребление энергии в процессе конверсии природного топлива способствует эффективному охлаждению извести, а высокий эксергетический потенциал синтетического топлива предполагает повышение производительности теплового агрегата. Рассматриваемый подход

зоны охлаждения печи, работающей на натуральном топливе и синтез-газе приведен в таблице 5.

Прирост химически аккумулированной теплоты конвертированного газа при конверсии 81,21 % 1 м³ метана составляет:

к повышению энергоэффективности теплообменных процессов в тепловых агрегатах с использованием вторичных энергоресурсов в процессах регенеративного теплообмена и вовлечением в состав конверсионного топлива воды можно рассматривать как пример энергосберегающей технологии, снижающей нагрузку на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

4. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высш. школа, 1980. 472 с.
5. Классен В.К., Шубин В.И. Энерго-ресурсосбережение при производстве цемента // Доклады II Междунар. совещ. по химии и технологии цемента. 2000. Т. 1. С. 30–34.
6. Коновалов В.М., Ткачев В.В., Черкасов А.В. Энергоэффективная технология производства портландцементного клинкера. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 99 с.
7. Спирин Ю.Л. Экономико-организационные и технические факторы снижения топливостроительных материалов. М.: ВНИИ-ЭСМ, 1984. 165 с.
8. Пат. №2497766 Российская Федерация, МПК C04B 7/44 Способ получения цементного клинкера; заявл. 5.10.2012; опубл. 10.11.13г., бюл. №31. / Коновалов В.М., Ткачев В.В., Литовченко А.В., Гончаров А.А., Бандурин, А.А. (Россия); заявитель БГТУ им. В.Г. Шухова. 3с.

9. Коновалов В.М., Перескок С.А., Петрова М.А., Образумов А.Н. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №4. С. 176–181

10. Арутюнов В.С., Крылов О.В. Окислительные превращения метана. М.: Наука, 1998. 361 с.

11. Матковский П.Е., Седов И.В., Савченко В.И. Технологии получения и переработки синтез-газа // Газохимия. 2011. С. 77–84.

12. Эр-Рибби Х., Буаллоу Ч., Веркофф Ф. Сухой риформинг метана – обзор технико-экономических обоснований // Химическая инженерия. 2012. № 29. С. 163–168.

13. Булеца О.К. Синтез-газ: совершенствование методов получения из углеводородного сырья. Многоцелевая газификация // Аналитический обзор. Черкассы, 2009. [Электронный ресурс]. URL: <http://niitehim.ck.ua> (дата обращения 05.02.2022).

14. Астафьев С.В., Рощенко О.С., Сергеев С.П. Технология получения синтез – газа паровой конверсией углеводородов // Химическая техника. 2016. № 6. С. 47–51.

15. Перескок С.А., Кудярова Н.П., Коновалов В.М., Щелокова Л.С. Теория горения топлива

и тепловые установки в производстве вяжущих материалов: методические указания к выполнению курсового проекта по курсу «Теория горения топлива и тепловые установки в производстве вяжущих материалов» для студентов, обучающихся по направлению 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. 63 с.

16. Корабельников А.В., Куранов А.Л., Рыжиков С.С. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т.4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2006-10-12-002_.pdf (дата обращения 05.02.2023)

17. Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Россия. Химия. журнал. 2000. Т. 44. №1. С. 19–33.

18. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, направление и технологическое использование: Справочное издание в 3 книгах. Книга 3.М.: Теплотехник, 2003. 592 с.

19. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М.: Мир, 2000. 176 с.

Информация об авторах

Коновалов Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: konovalov52@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гостев Николай Сергеевич, бакалавр. E-mail: gostev.nik0412@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Федоров Александр Сергеевич, аспирант. E-mail: fedorov@akkermann.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Поступила 27.12.2022 г.

© Коновалов В.М., Гостев Н.С., Федоров А.С., 2023

***Konovalov V.M., Gostev N.S., Fedorov A.S.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: konovalov52@mail.ru*

MATERIAL AND THERMAL BALANCE OF THE SHAFT FURNACE FOR LIME PRODUCTION USING CHEMICAL HEAT RECOVERY

Abstract. The results of the analysis of energy-efficient technology on the example of obtaining construction lime on the model of a shaft furnace are presented. The calculation of the material and thermal balance of a shaft furnace for lime production using synthetic fuel obtained in the process of chemical heat regeneration of secondary energy resources (SER) is presented. Saving energy resources and reducing technological emissions with a lower concentration of greenhouse gases is an urgent task. It involves the development of new approaches to improving heat exchange processes and increasing their exergetic capabilities. The involvement of secondary energy resources (heat of cooled lime) in the production of synthetic fuel – synthesis gas by steam-water and carbon dioxide conversion of natural fuel, on the one hand, allows to increase the intensity of cooling of firing products due to the high endothermic effect of the methane conversion reaction,

and on the other hand, to increase the heat production of the resulting mixture of hydrogen and carbon monoxide. The use of this technology allows to reduce the consumption of natural fuel, by involving more than 45% of water in the synthetic fuel in the combustion process, to increase the efficiency of the installation and reduce the amount of exhaust gases by 19%.

Keywords: production of building materials, technology of chemical heat regeneration, lime firing, binders, energy saving.

REFERENCES

1. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials [Himicheskaya tekhnologiya vyazhushchih materialov]. M.: Higher School, 1980. 472 p.
2. Klassen V.K., Shubin V.I. Energy-resource saving in cement production [Energo-resursosberezhenie pri proizvodstve cementa]. Reports of the II International. confer. on chemistry and technology of cement. M., 2000. Vol. 1. Pp. 30–34
3. Konovalov V.M., Tkachev V.V., Cherkasov A.V. Energy-efficient technology of production of Portland cement clinker [Energoeffektivnaya tekhnologiya proizvodstva portlandcementnogo klinkera]. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2016. 99 p.
4. Spirin Yu.L. Economic, organizational and technical factors of reducing the fuel consumption of building materials [Economic, organizational and technical factors of reducing the fuel consumption of building materials]. M.: VNIIESM, 1984. 165 p.
5. Pat. No.2497766 Russian Federation, IPC C04B 7/44 Method of obtaining cement clinker [Sposob polucheniya cementnogo klinkera] / Konovalov V.M., Tkachev V.V., Litovchenko V., Goncharov A.A., Bandurin, A.A. (Russia); applicant BSTU named after V.G. Shukhov; application 5.10.2012; publ. 10.11.13, byul.No.31.3p.
6. Konovalov V.M., Pereskok S.A., Petrova M.A., Obrazumov A.N. Improving the efficiency of heat and mass transfer processes in cement production [Povyshenie effektivnosti teplomassoobmennyyh processov v proizvodstve cementa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 176–181.
7. Arutyunov V.S., Krylov O.V. Oxidative transformations of methane [Okislitel'nye prevrashcheniya metana]. M.: Nauka, 1998. 361 p.
8. Matkovsky P.E., Sedov I.V., Savchenko V.I. Technologies of synthesis gas production and processing [Tekhnologii polucheniya i pererabotki sintez-gaza]. Gas Chemistry. 2011. Pp.77–84.
9. Rib H., Bualow C., Verkoff F. Dry reforming of methane – a review of feasibility studies [Suhoj riforming metana – obzor tekhniko ekonomicheskikh obosnovaniy]. Chemical Engineering. 2012. No. 29. Pp. 163–168.
10. Bulets O.K. Synthesis gas: improvement of methods of obtaining from hydrocarbon raw materials. Multipurpose gasification [Sintez-gaz: sovershenstvovanie metodov polucheniya iz uglevodородного syr'ya. Mnogocелеvaya gazifikatsiya]. Analytical review. Cherkassy, 2009. URL: <http://niitechim.ck.ua> (date of treatment: 05.02.2022)
11. Astafyev S.V., Roschenko O.S., Sergeev S.P. Technology of synthesis gas production by steam conversion of hydrocarbons [Tekhnologiya polucheniya sintez – gaza parovoj konversiej uglevodородov]. Chemical engineering. 2016. No. 6. Pp. 47–51.
12. Pereskok S.A., Kudayarova N.P., Konovalov V.M., Shchelokova L.S. Combustion theory and thermal installations in the production of binders [Teoriya gorennya topliva i teplovye ustanovki v proizvodstve vyazhushchih materialov]: guidelines for the implementation of the course project on the course "Theory of fuel combustion and thermal installations in the production of binders" for students studying in the direction of 18.03.02 – Energy and resource-saving processes in chemical technology, petrochemistry and biotechnology. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017. 63 p
13. Korabelnikov A.V. Chemical regeneration of heat and fuel conversion in power plants [Himicheskaya regeneratsiya tepla i preobrazovaniya topliva v energeticheskikh ustanovkakh]. Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2006. Vol. 4. URL: http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2006-10-12-002_.pdf (date of treatment: 05.02.2023)
14. Krylov O.V. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas [Uglekislotsnaya konversiya metana v sintez-gaz]. Russia. Chemistry. journal. 2000. Vol. 44. No. 1. Pp. 19–33.
15. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev G. Fuel. Rational combustion, management and technological use [Toplivo. Ratsional'noe szhiganiye, upravleniye i tekhnologicheskoye ispol'zovaniye]: A reference edition in 3 books. Book 3. Moscow: Teplotekhnika, 2003. 592 p.
16. Shiller V. Arrhenius equation and non-equilibrium kinetics [Uravneniye Arrheniusa i neravnovesnaya kinetika]. M.: Mir, 2000. 176 p.

Information about the authors

Kononov, Vladimir M. PhD. E-mail: kononov52@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gostev, Nikolay S. Bachelor student. E-mail: gostev.nik0412@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Fedorov, Alexander S. Post-graduate student. E-mail fedorov@akkermann.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.12.2022

Для цитирования:

Коновалов В.М., Гостев Н.С., Федоров А.С. Повышение энергоэффективности тепломассообменных процессов в технологии вяжущих материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 85–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-85-92

For citation:

Kononov V.M., Gostev N.S., Fedorov A.S. Material and thermal balance of the shaft furnace for lime production using chemical heat recovery. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 85–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-85-92

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101

***Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В.**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ ТИПОВ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ МАТРИЧНЫХ (ВЯЖУЩИХ) СИСТЕМ

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты комплексного изучения вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов высокоглиноземистых матричных систем, полученных полностью на основе отечественных компонентов – высокоглиноземистой высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии (ВКВС) и суспензии на основе реактивного глинозема (РГ). В качестве объектов исследования выступали четыре образца экспериментальных высокоглиноземистых матричных систем (ВМС), сопоставимые по своему гранулометрическому составу. Согласно результатам рентгенофазового анализа, ВМС на основе реактивного глинозема характеризуются содержанием фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ более 99 %, в то время как образцы ВКВС являются полифазными с преобладанием в минеральном комплексе муллита, альфа-оксида алюминия и кварца. Характер распределения частиц в исследованных образцах различен: представлены как мономодальные ВМС с узким распределением частиц и медианным размером порядка 0,8 мкм, так и бимодальные с медианным размером 4 мкм и более. Содержание субмикронной фракции (размер частиц менее 1 мкм) варьируется в пределах от 10–15 % до 60 %. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлены особенности микроструктуры и детально изучена морфология частиц твердой фазы ВМС обоих типов. С использованием микрорентгеноспектрального анализа установлен химический (элементный) состав исследованных материалов.

Ключевые слова: огнеупорные литьевые массы, керамобетоны, низкоцементные бетоны, матричные системы, суспензии, реактивный глинозем, дисперсность, сканирующая электронная микроскопия.

Введение. В последние десятилетия, как за рубежом, так и в России, широкое практическое применение получили огнеупорные литьевые массы (бетоны) нового поколения. Согласно общепринятым понятиям такие огнеупорные материалы можно рассматривать как композиционные (гетерогенные) системы, состоящие из огнеупорного заполнителя и матрицы (вяжущей системы). Условно принимается, что матрица является гомогенной, обладает свойствами непрерывности и выступает в роли дисперсионной среды. Заполнитель в свою очередь имеет границу раздела, а его зерна лишь ограниченно взаимодействуют с вяжущей системой [1–3].

В то же время такие вяжущие системы (матрицы) можно рассматривать как высококонцентрированные суспензии, дисперсной фазой в которых являются тонкие частицы огнеупорных компонентов, а дисперсионной средой является вода с добавками различной химической природы, вводимыми для регулирования реотехнологических свойств. Функция матричной системы (МС) заключается в том, что она способна консолидировать в единое целое многочисленные полидисперсные зерна заполнителя, что в свою очередь придает монолитность и заданную форму изделию или футеровке, а также обеспечивает передачу механических и термических

напряжений на заполнитель и предохраняет его от коррозионных воздействий [1, 4, 5].

В настоящее время можно выделить два альтернативных типа огнеупорных литьевых масс нового поколения – керамобетоны (бесцементные огнеупорные бетоны) и низкоцементные литьевые массы [1, 6].

В технологии низкоцементных бетонов в качестве матрицы выступают системы, состоящие из высокоглиноземистого цемента и ультрадисперсных порошков. В последние десятилетия успешно апробированы в промышленных условиях ВМС для низкоцементных огнеупорных масс с применением тонкодисперсного активированного оксида алюминия – реактивного глинозема (РГ). Базовым сырьевым материалом для производства реактивного глинозема является кальцинированный оксид алюминия. Этот продукт получают обжигом (кальцинацией) байерского гидроксида алюминия при температуре более 1200 °С. В результате указанного процесса образуются первичные кристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, размер которых зависит от термической истории и может находиться в диапазоне от 0,5 до 5 мкм. Чем выше температура обжига, тем больше размер плотных беспористых первичных кристаллов и содержание оксида алюминия в α -форме. В порошках реактивного глинозема твердофазный материал, как правило, измельчен до размера

первичных кристаллов (0,5 – 2 мкм), а значительная доля частиц имеет субмикронный размер (менее 1 мкм). Доля субмикронных частиц в готовых продуктах может находиться в пределах 20 – 90 %. Такие высокодисперсные порошки альфа-оксида алюминия реактивны в том смысле, что они легко спекаются до максимальной плотности при температурах на 100 – 200 °С ниже, чем грубодисперсные порошки. Структурная и поверхностная активность реактивных глинозёмов определяется дефектностью кристаллического строения, размером и формой частиц, что обуславливает уменьшение энергии активации спекания [7, 8]. В связи с вышесказанным к числу важных технологических преимуществ ВМС на основе реактивного глинозёма можно отнести не только улучшение реотехнологических свойств огнеупорных литевых масс, но и формирование плотной керамической матрицы при пониженных температурах спекания, а также отсутствие легкоплавких эвтектик. Это позволяет получать теплотехнические композиционные материалы с высокими эксплуатационными характеристиками [8–10]. Однако сама технология получения реактивного глинозёма, не является достаточно экологичной, поскольку предусматривает сухой помол кальцинированного высокоглинозёмистого сырья [11, 12], что обуславливает пылеунос ультрадисперсных частиц $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в окружающую среду. Как результат, это приводит к усложнению и удорожанию аппаратурно-технологического оформления, так как требует обязательного использования дорогостоящей аспирационной системы.

В технологии керамобетонов ВМС представлена высококонцентрированной керамической вяжущей суспензией (ВКВС). Концепция использования таких вяжущих в технологии огнеупорных литевых масс базируется на том факте, что большинство нативных кремнезёмистых и алюмосиликатных минералов по своему строению можно рассматривать как неорганические полимеры [1, 5, 13]. ВКВС представляют собой минеральные водные суспензии, получаемые преимущественно путем мокрого помола в щелочной среде кремнезёмистых или алюмосиликатных материалов при высокой концентрации твердой фазы и повышенной температуре. Именно в таких условиях происходит наработка определенной доли наночастиц – коллоидного компонента. Коллоидный компонент высококонцентрированных керамических вяжущих суспензией представляет собой довольно сложный состав, включающий, в том числе, остатки твердой фазы, продукты намолла мелющих тех, а также различного рода примеси, которые переходят в

дисперсионную среду при частичном растворении поверхности размалываемых твердых зерен. Благодаря наличию оптимальной доли наноразмерных коллоидных частиц достигается требуемая полидисперсность твердой фазы, и, как следствие, минимизация количества связанной жидкости. Это в свою очередь обеспечивает минимальную пористость и высокую прочность отливок [13–15]. Однако, матричные системы на основе ВКВС вместе с рядом очевидных преимуществ, имеют и существенные недостатки, связанные со сложностями при их транспортировке и хранении.

Целью настоящей работы являлся анализ вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов водных высокоглинозёмистых МС – высокоглинозёмистой высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии и суспензии на основе реактивного глинозёма.

Методология. В настоящей работе экспериментальными объектами являлись образцы двух типов высокоглинозёмистых матричных систем: 1 – на основе высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии (ВКВС-1 и ВКВС-2); 2 – на основе реактивного глинозёма (РГ-1 и РГ-2). Все компоненты вышеупомянутых типов МС были изготовлены на российских промышленных предприятиях из полностью отечественного импортонезависимого сырья.

Фазовый состав материалов определяли методом РФА на дифрактометре Ultima IV (Rigaku Япония) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), схема съемки Брэгга-Брентано, со скоростью сканирования 2 град/мин в диапазоне углов 2θ от 10 до 70, с шагом сканирования $0,02^\circ$. Идентификация пиков проводилась с использованием базы данных PDF-2. Экспериментальные дифрактограммы обрабатывали с помощью программы PDXL (Rigaku Corporation) с уточнением по методу Ритвельда. Соотношение фаз рассчитывали методом корундовых чисел.

Гранулометрический состав экспериментальных образцов определяли методом лазерной дифракции с помощью анализатора «Microtrac S3500» (США). В качестве дисперсионной среды при исследовании использовали дистиллированную воду. Перед измерением проводили ультразвуковое диспергирование пробы в дисперсионной среде в течение 30 с.

Морфологические исследования материалов проводили на растровых электронных микроскопах Quanta 200 3D и Quanta 600 FEG (FEI, Нидерланды). Изображения получали с использованием детектора обратно-рассеянных электронов в режиме низкого вакуума. Давление в камере –

80 Па, ускоряющее напряжение – 30 кВ. Для исследования в сканирующем режиме образцы наклеивали на медную подложку с помощью проводящего углеродного клея.

Элементный состав твердой фазы суспензий определяли методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием анализатора

EDAX, совмещенного с растровым электронным микроскопом Quanta 200 3D.

Основная часть. На первом этапе исследования проведен анализ фазового состава представленных образцов ВМС. Установлено, что матричные системы на основе реактивного глинозема являются монофазными с содержанием α - Al_2O_3 (корунда) – более 99 % (рис. 1).

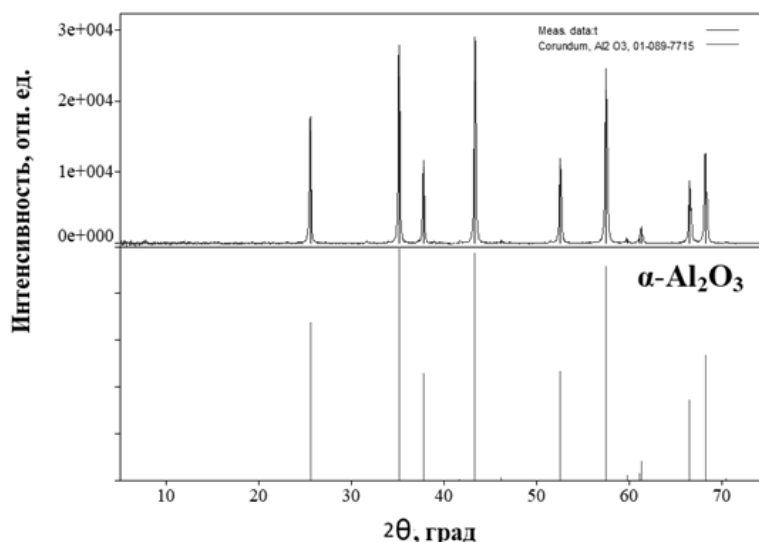


Рис. 1. Типичная рентгеновская порошковая дифрактограмма для образцов РГ-1 и РГ-2

Образцы ВКВС являются полифазными системами (рис. 2). Основными компонентами указанных образцов являются: муллит – содержание 55–57 %, α -оксид алюминия – в количестве 29–

32 %, кварц – в пределах 11–13 %. Также в минералогической композиции присутствует незначительная примесь кристобаллита (до 1 %).

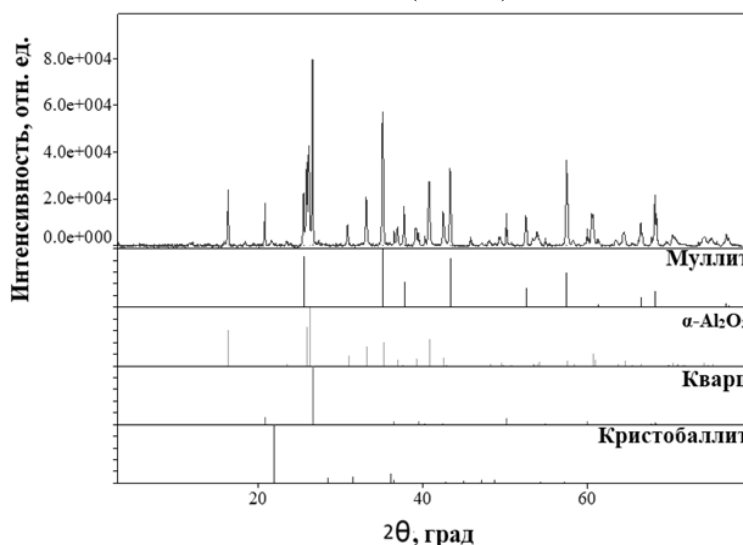


Рис. 2. Типичная рентгеновская порошковая дифрактограмма для исследованных образцов ВКВС

Дисперсность матричных компонентов литьевых масс является одним из приоритетных факторов, оказывающих прямое воздействие, как на их реологическое поведение, так и на прочность готовых продуктов за счет формирования плотноупакованной системы [1, 16, 17]. Выбор оптимального зернового состава способствует экономии вяжущего, как наиболее дорогого ком-

понента. В то же время известным фактом является то, что во многих случаях избыток вяжущего компонента ухудшает качество огнеупорных бетонов. На следующем этапе исследования проведена детальная оценка гранулометрического состава экспериментальных матричных (вяжущих) систем. Полученные результаты представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

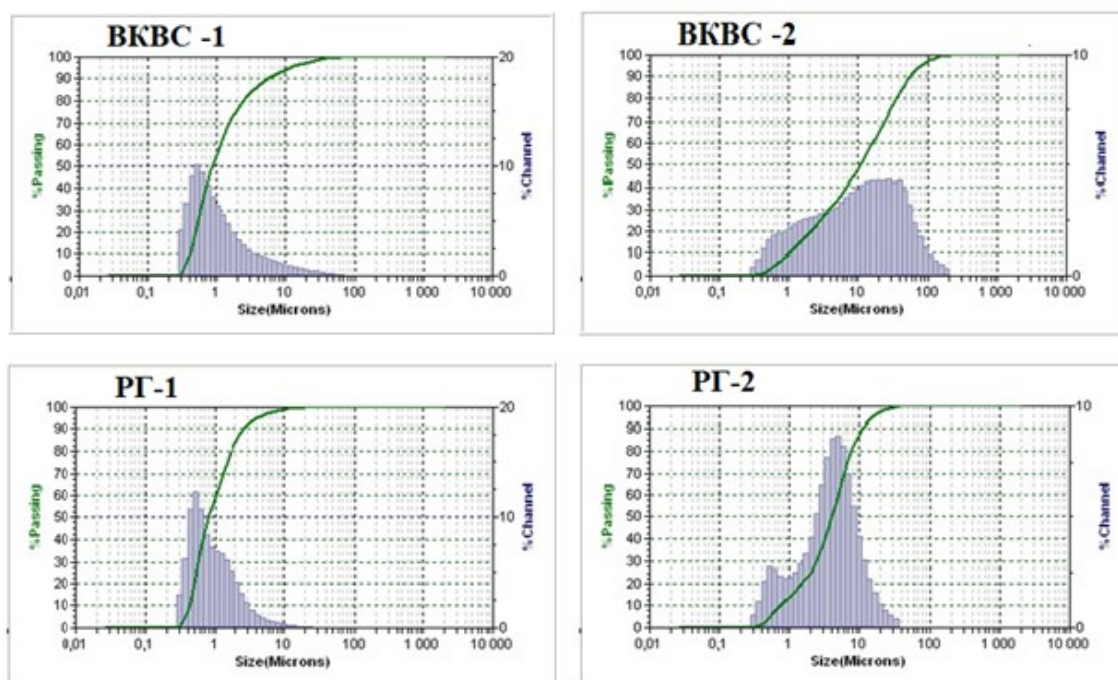


Рис. 3. Интегральные кривые и гистограммы распределения частиц в исследованных материалах

При анализе данных, представленных на рисунке 3, установлено, что образцы ВКВС-1 и РГ-1 имеют мономодальный характер распределения частиц по размерам. Максимумы мод в обоих случаях располагаются в области 0,5–0,6 мкм.

В тоже время, образец РГ-2 характеризуется ярко выраженным бимодальным зерновым рас-

пределением. Максимум первой моды соответствует 0,5 мкм, а второй – располагается в диапазоне 4,0–5,0 мкм. Что касается образца ВКВС-2, то в данном случае определение модальности несколько затруднено ввиду отсутствия четко выраженных максимумов.

Таблица 1

Гранулометрический состав твердой фазы экспериментальных ВМС

Образец	D ₂₀	D ₅₀	D ₉₀	Содержание субмикронной фракции (≤ 1 мкм), %
ВКВС-1	0,49	0,86	5,48	58,0
ВКВС-2	2,05	10,60	55,32	10,5
РГ-1	0,49	0,80	2,56	62,0
РГ-2	1,50	4,04	10,85	15,0

Установлено, что матричные системы ВКВС-1 и РГ-1 имеют сопоставимый гранулометрический состав. Это видно, в том числе, и из медианного размера частиц, который составляет соответственно 0,86 и 0,80 мкм. Содержание субмикронной фракции для обоих исследованных образцов находится в пределах 60 ± 2 %. В тоже время содержание фракции зерен с размером менее 1 мкм для ВКВС-2 и РГ-2 сравнительно невысоко и находится в пределах 10–15 %. При этом D₅₀ для образца РГ-2 более, чем в 2,5 раза ниже, по сравнению с тем же показателем у ВКВС-2, который характеризуется наиболее крупной дисперсностью из всех исследованных материалов.

Методом сканирующей электронной микроскопии выявлены особенности морфологии частиц твердой фазы экспериментальных МС (рис. 4 и 5).

Согласно данным СЭМ (рис. 4а), микроструктуру образца РГ-1 формируют первичные кристаллиты α -Al₂O₃, представляющие собой хорошо оформленные беспористые сферические зерна размером от 0,5 до 1 мкм. Частицы демонстрируют невысокую склонность к агрегации, что хорошо заметно при большом увеличении.

Частицы, слагающие образец РГ-2, можно подразделить на два морфологических типа (рис. 4б). Первый тип формируют крупные монолитные зерна призматической формы размером 10–20 мкм. Вторая группа представлена остроугольными пластинчатыми кристаллитами, размер которых варьируется в диапазоне от долей до 1–2 мкм.

В свою очередь на СЭМ-микрофотографиях образцов ВКВС-1 и ВКВС-2 также отчетливо можно дифференцировать два типа частиц (рис. 5). В обоих образцах основу высокодисперсной

фракции составляют изометричные пластины размером 1–2 мкм, которые равномерно распределены между плотными объемными кристаллитами. К особенностям таких крупных зерен следует отнести наличие характерных острых углов и сколов, образующихся в процессе измельчения

материалов. Несмотря на схожесть в морфологии, обращает на себя существенная разница в размерах частиц данного типа: для образца ВКВС-1 размер составляет порядка 3–5 мкм (рис. 5а), в то время как аналогичные зерна крупной фракции в образце ВКВС-2 достигают 10–15 мкм (рис. 5б).

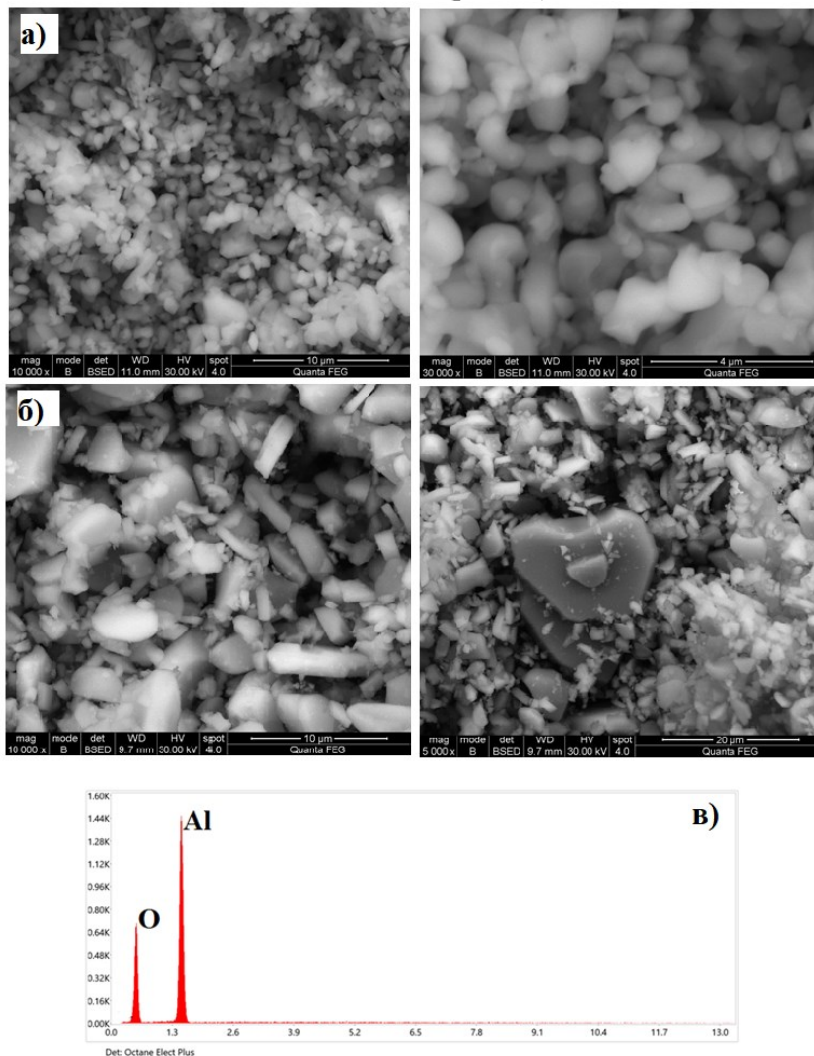


Рис. 4. СЭМ-микрофотографии образцов РГ-1 (а) и РГ-2 (б); типичный энергодисперсионный спектр для исследованных ВМС на основе реактивного глинозема (в)

Таким образом, данные СЭМ (рис. 4 и 5) хорошо согласуются с результатами определения гранулометрического состава экспериментальных образцов и наглядно подтверждают характер модальности распределения частиц в исследованных образцах. Следует отметить, что полимодальность способствует более высокой плотности упаковки, что улучшает реологические свойства литейных масс.

На энергодисперсионных спектрах для обоих исследованных образцов реактивного глинозема зафиксированы только два элемента – алюминий и кислород (рис. 4в). Исходя из полу-

ченных данных установлено, что содержание оксида алюминия для образцов РГ-1 и РГ-2 составляет более 99 масс. %.

Химический состав твердой фазы образцов ВКВС более разнообразен и включает следующие элементы (в порядке убывания): кислород (до 57 масс. %), алюминий (26–27 масс. %), кремний (12–13 масс. %), титан и железо (порядка 1,5 масс. %). Остальные элементы – натрий, магний, калий, кальций и хром встречаются в качестве примесных в количестве 0,2–0,3 масс. %. Полученные результаты по определению элементного состава хорошо согласуются с данными о минералогическом комплексе образцов.

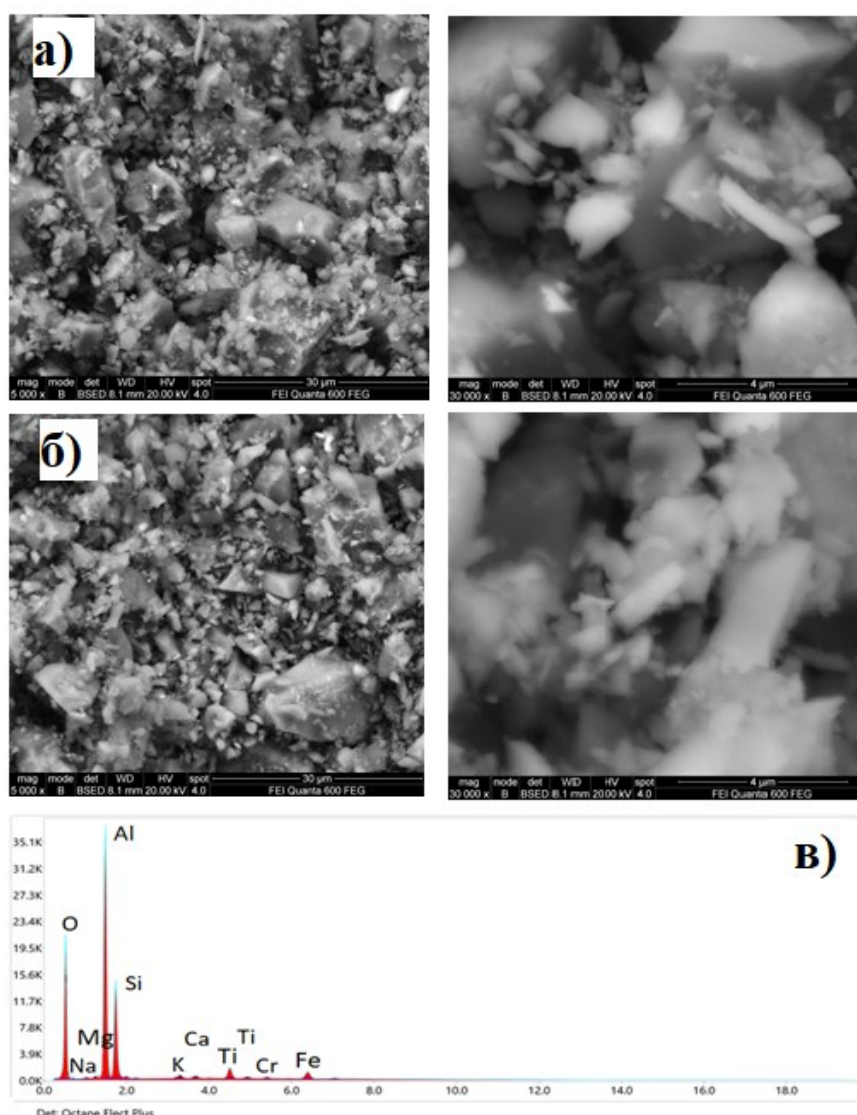


Рис. 5. СЭМ-микрофотографии образцов ВКВС-1 (а) и ВКВС-2 (б); типичный энергодисперсионный спектр для исследованных систем ВКВС (в)

Выводы. Проведено комплексное исследование вещественного состава и структурно-морфологических характеристик высокоглиноземистых тонкодисперсных матричных систем, полученных на основе отечественных импортонезависимых компонентов. Показано, что по своему фазовому составу ВМС на основе ВКВС представляет собой полифазную систему, основными компонентами которой являются: муллит, альфа-оксид алюминия и кварц. ВМС на основе реактивного глинозёма представляет собой монофазную систему, единственной фазой является альфа-оксид алюминия.

Содержание Al_2O_3 в образцах на основе РГ составляет более 99 масс. %. Химический состав твердой фазы суспензий ВКВС является полиэлементным, с преобладанием кислорода, алюминия и кремния.

Выявлено, что изученные экспериментальные образцы матричных систем имеют сопоставимый гранулометрический состав. Образцы

ВКВС-1 и РГ-1 характеризуются мономодальными зерновым распределением и медианным размером частиц в районе 0,8–0,9 мкм. Образцы ВКВС-2 и РГ-2 имеют более крупный медианный размер частиц: порядка 10 и 4 мкм соответственно. При этом для суспензии РГ-2 характерно ярко-выраженное бимодальное распределение частиц, в то время как для ВКВС-2 определение модальности затруднено.

Установлено, что микроструктура образца РГ-1 принципиально отличается от других исследованных материалов, поскольку сформирована только одним морфологическим типом частиц – плотными беспористыми сферическими кристаллами $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ примерно одного размера. Для всех остальных матричных систем в микроструктуре отчетливо визуализируются два типа зерен: крупные остроугольные монолитные призматические кристаллиты (размером от 3–5 мкм и более) и изоморфные пластинчатые кристаллиты (до 1–2 мкм).

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке технологичной и стабилизированной на коллоидно-химическом уровне матричной системы смешанного типа, успешно сочетающей основные преимущества ВМС на основе ВКВС и реактивного глинозема.

Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры. Т. 1. М.: Теплоэнергетик, 2003. 448 с.
2. ГОСТ 34470-2018. Бетоны огнеупорные. М.:Стандартинформ, 2018. 12 с.
3. Luz A.P., Braulio M.A.J., Pandolfelli V.C. Refractory Castable Engineering. GollerVerlagGmbH, Baden-Baden, Germany, 2015. 734 p.
4. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.:Высшая школа, 1980. 472 с.
5. Пивинский Ю.Е. Керамические и огнеупорные материалы: избр. тр. Т. 2. СПб.: Стройиздат СПб. 2003. 668 с.
6. Пивинский Ю.Е., Трубицын М.А. Огнеупорные бетоны нового поколения. Общие характеристики вяжущих систем // Огнеупоры. 1990. № 12. С. 1–8.
7. Ghose S., Saigal C., Maldhure A., Das S.K. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable // Trans. Indian Ceram. Soc. 2013. Vol. 72. № 2. Pp. 113–118.
8. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.B., Kuzin V. I., Zubashchenko R. V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 1. Methods for preparing reactive alumina // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. Pp. 130–136. DOI: 10.1007/s11148-022-00694-w
9. Gürelib S.B., Altunib A. Reactive alumina production for the refractory industry // Powder Technology. 2009. Vol. 196. P. 115–121. DOI:10.1016/j.powtec.2009.07.007.
10. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 2. Efficiency of preparing finely dispersed aluminium oxide powder using a ball mill // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. № 2. Pp. 137–142. DOI:10.1007/s11148-022-00695-9
11. Ban T., Okada K., Hayashi T., Otsuka N. Mechanochemical effects for some Al_2O_3 powders of dry grinding // Journal of materials science. 1992. №27. Pp. 465–471.
12. Reid C.B., Forrester J., Goodshaw H.J., Suaning G.J. Study in the mechanical milling of alumina powder // Ceramics International. 2008. Vol. 34. №6. Pp. 1551–1556
13. Пивинский Ю.Е., Гришпун Е.М., Гороховский А.М. Разработка технологий, производство и служба формованных и неформованных огнеупоров на основе ВКВС // Новые огнеупоры. 2015. №5. С. 29–39. DOI:10.17073/1683-4518-2015-5-29-39
14. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Остряков Л.В. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 12. ВКВС композиционного состава (боксит, электрокорунд, кварцевое стекло) и некоторые свойства материалов на их основе // Новые огнеупоры. 2017. № 10. С. 15–21. DOI:10.17073/1683-4518-2017-10-15-21.
15. Онищук В.И., Месяц М.В., Евтушенко Е.И., Дороганов В.А. Особенности высококонцентрированных вяжущих суспензий на основе керамических материалов и силикатных стекол // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 10. С. 21–26.
16. Sarkar R. Particle Size Distribution for Refractory Castables: A Review // Interceram - International Ceramic Review. 2016. Vol. 65. Pp. 82–86. DOI:10.1007/BF03401156
17. Kiennemann J., Chabas E., Ulrich C., Dumont D. The role of granulometry and additives in optimising the alumina matrix in low cement castables // Refractories WORLDFORUM 9. 2017. Pp.77–82.

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Воловicheva Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Фурда Любовь Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Курбатов Аким Петрович, студент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: 1519471@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Лисняк Виктория Владимировна, аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Поступила 15.08.2023 г.

© Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В., 2023

**Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kurbatov A.P., Lisnyak V.V.*

Belgorod National Research University

**E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

INVESTIGATION OF THE MATERIAL COMPOSITION AND STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TWO TYPES OF HIGH-ALUMINA MATRIX (BINDER) SYSTEMS

Abstract. *The results of a comprehensive study of the material composition and structural and morphological characteristics of two types of high-alumina matrix systems, obtained entirely on the basis of domestic components - high-alumina highly concentrated suspension of ceramic binder (HCBS) and suspension based on reactive alumina (RA), are presented. The objects of study are four samples of experimental high-alumina matrix systems (HMS), comparable in particle size distribution. According to the results of X-ray phase analysis, HMS based on reactive alumina are characterized by the content of the α - Al_2O_3 phase of more than 99 %, while the samples of HCBS are polyphase with a predominance of mullite, alpha-alumina and quartz in the mineral complex. The nature of the distribution of particles in the studied samples is different: both monomodal HMS with a narrow distribution of particles and a median size of about 0.8 μm , and bimodal HMS with a median size of 4 μm or more are presented. The content of the submicron fraction (particle size less than 1 micron) varies from 10–15 % to 60 %. Using scanning electron microscopy, the features of the microstructure were revealed and the morphology of the particles of the solid phase of HMS of both types is studied in detail. Using X-ray microanalysis, the chemical (elemental) composition of the studied materials is established.*

Keywords: *refractory castables, ceramic castables, low-cement castables, matrix systems, suspensions, reactive alumina, dispersion, scanning electron microscopy.*

REFERENCES

1. Pivinskij Yu.E. Unformed refractories [Neformovannyye ogneupory]. Vol. 1. M.: Teploenergetik, 2003. 448 p. (rus)
2. GOST 34470-2018. Refractory concretes [Betony ogneupornyye]. M.: Standartinform, 2018. 12 p. (rus)
3. Luz A.P., Braulio M.A.J., Pandolfelli V.C. Refractory Castable Engineering. Goller Verlag GmbH, Baden-Baden, Germany, 2015. 734 p.
4. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials [Himicheskaya tehnologiya vyazhushchih materialov]. M.: Vysshaya Shkola, 1980. 472 p. (rus)
5. Pivinskij Yu.E. Ceramic and refractory materials: selected works [Keramicheskie i ogneupornyye materialy: izbr. tr.] T. 2. SPb.: Strojizdat SPb. 2003. 668 p. (rus)
6. Pivinskij Yu.E., Trubitsyn M.A. Refractory concretes of the new generation. General characteristics of binding systems [Ogneupornyye betony novogo pokoleniya. Obshchie harakteristiki vyazhushchih system]. Refractories. 1990. No. 12. Pp. 1–8. (rus)
7. Ghose S., Saigal C., Maldhure A., Das S. K. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable. Trans. Indian Ceram. Soc. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 113–118.
8. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.B., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 1. Methods for preparing reactive alumina. Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. Pp. 130–136. DOI:10.1007/s11148-022-00694-w
9. Gürel S. B., Altunib A. Reactive alumina production for the refractory industry. Powder Technology. 2009. Vol. 196. Pp. 115–121. DOI:10.1016/j.powtec.2009.07.007.
10. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 2. Efficiency of preparing finely dispersed aluminium ox-

ide powder using a ball mill. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022. Vol. 63. No 2. Pp. 137 – 142. DOI:10.1007/s11148-022-00695-9.

11. Ban T., Okada K., Hayashi T., Otsuka N. Mechanochemical effects for some Al_2O_3 powders of dry grinding. *Journal of materials science*. 1992. No. 27. Pp. 465–471.

12. Reid C.B., Forrester J., Goodshaw H.J., Suaning G.J. Study in the mechanical milling of alumina powder. *Ceramics International*. 2008. Vol. 34. No 6. Pp. 1551–1556.

13. Pivinskij Yu.E., Grishpun E.M., Gorohovskij A.M. Technology development, production and service of molded and unformed refractories based on HCBS [Razrabotka tehnologij, proizvodstvo i sluzhba formovannyh i neformovannyh огнеупоров на основе VKVS]. *New refractories*. 2015. No. 5. Pp. 29–39. DOI:10.17073/1683-4518-2015-5-29-39 (rus)

14. Pivinskij Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V. Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina HCBS. Part 12. HCDS of composite composition (bauxite, electrocorundum, quartz glass) and some

properties of materials based on them [Issledovaniya v oblasti polucheniya formovannyh i neformovannyh огнеупоров на основе высокоглиноземистых VKVS. Chast' 12. VKVS kompozicionnogo sostava (boksit, elektrokorund, kvarcevoe steklo) i nekotorye svoystva materialov na ih osnove]. *New refractories*. 2017. No. 10. Pp. 15–21. DOI:10.17073/1683-4518-2017-10-15-21 (rus)

15. Onishchuk V.I., Mesyac M.V., Evtushenko E.I., Doroganov V.A. Features of highly concentrated binding suspensions based on ceramic materials and silicate glasses [Osobennosti vysokokontsentrirannyh vyzhushchih suspenzij na osnove keramicheskikh materialov i silikatnyh stekol]. *New refractories*. 2014. No. 10. Pp. 21–26. (rus)

16. Sarkar R. Particle Size Distribution for Refractory Castables: A Review. *Interceram - International Ceramic Review*. 2016. Vol. 65. Pp. 82–86. DOI: 10.1007/BF03401156

17. Kiennemann J., Chabas E., Ulrich C., Dumont D. The role of granulometry and additives in optimising the alumina matrix in low cement castables. *Refractories WORLDFORUM* 9. 2017. Pp.77–82.

Information about the authors

Trubitsin, Mikhail A. PhD, Professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Volovicheva, Natalya A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda, Lyubov V. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Kurbatov, Akim P. Student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: 1519471@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Lisnyak, Viktoriya V. Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 15.08.2023

Для цитирования:

Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В. Исследование вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов высокоглиноземистых матричных (вяжущих) систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 93–101 DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101

For citation:

Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kurbatov A.P., Lisnyak V.V. Investigation of the material composition and structural and morphological characteristics of two types of high-alumina matrix (binder) systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 10. Pp. 93–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-102-111

¹Искачёв С.А., ¹Совков А.Н., ¹Яркин А.Л., ^{2,*}Подoliaк О.О.,²Овчинникова В.А., ²Лавринов Д.С.¹Производственное объединение Уральский оптико-механический завод имени Э.С. Яламова²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

*E-mail: o.o.podoliak@urfu.ru

ВЫБОР МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Важным аспектом в производстве геодезического оборудования является контрольно-измерительная проверка деталей всего агрегата. Поднимается проблема выбора метода контроля геометрических размеров деталей при производстве геодезической продукции. Простой анализ и дальнейший выбор метода контроля не дает однозначного ответа, какой из методов будет максимально соответствовать требованиям конкретного производственного подразделения и технологического процесса. Исследователи разработали алгоритм выбора метода контроля геометрических размеров деталей, состоящий из 6 этапов. Для апробации предложенной методики анализа рассматривались контрольно-измерительные операции, согласно технологическим картам при производстве электронных тахеометров. Преимущество представленного алгоритма заключается в учете максимального количества параметров при анализе, учитывающем как технические, так и организационные факторы. Данный метод может быть использован для любого объекта при изменении параметров анализа. В исследовании проведена апробация алгоритма по анализу наиболее востребованных методов контроля. Для выполнения первых трех этапов алгоритма необходимо сформировать экспертную комиссию, что может привносить субъективность в процесс оценки параметров анализа. Заключительные этапы алгоритма выбора метода контроля являются расчетными. Результатом предложенной методики является расчет взвешенного параметрического индекса.

Ключевые слова: метод контроля, геодезическая продукция, контрольно-измерительные операции, точность измерения.

Актуальность. В настоящее время производство геодезического оборудования в России остается актуальным и востребованным, особенно учитывая ограничения присутствия иностранных производителей на рынке выполнения исполнительных съёмок застроенных и строящихся территорий. Геодезическая отрасль имеет ключевое значение для различных секторов экономики, включая строительство, горнодобывающую промышленность, сельское хозяйство, а также для государственных и общественных проектов, например, для выполнения исполнительных съёмок застроенных и строящихся территорий, в том числе плано-высотного обоснования. Стоит отметить растущий интерес к применению геодезического оборудования в сельском хозяйстве. Точные измерения позволяют улучшить агротехнику, оптимизировать распределение ресурсов и повысить эффективность земельных работ. Осуществление масштабных инфраструктурных проектов требует высокой надежности и допустимой погрешности геодезических данных, что стимулирует развитие этой отрасли.

Российские производители геодезического оборудования стремятся удовлетворить потреб-

ности, как на внутреннем рынке, так и за рубежом. Экспорт геодезических технологий и оборудования позволяет укреплять позиции российской индустрии на мировом рынке и привлекать иностранные инвестиции.

Таким образом, мы можем говорить о растущем спросе на геодезическое оборудование, что предъявляет соответствующие требования к производителям подобного оборудования. Одним из процессов производства высокотехнологичной продукции является контрольно-измерительный, требующий высокоточных измерений деталей собираемого агрегата. В статье обосновывается выбор измерительного оборудования, используемого при производстве линейки высокоточного геодезического оборудования, отвечающего всем требованиям, предъявляемым к промышленной продукции российского происхождения, на примере электронных тахеометров серии 6Та2, 6Та3, 6Та2 МО.

Исходные данные и методология. Для измерения геометрического профиля детали существует несколько методов [1–4]:

- контактный метод;
- коноскопический метод;
- интерференционный метод;

- метод контроля профиля на основе технологии «лидар»;
- методы с применением лазерных триангуляционных сканеров.

Выбор метода измерения зависит от типа и сложности детали, допустимой погрешности, доступности оборудования и других факторов. Комбинация различных методов может быть использована для более полного и точного определения геометрического профиля детали.

Каждый из представленных методов имеет свои особенности применения, ограничения по поверхности объекта, материала, допустимой погрешности и ряда других параметров, что приводит к необходимости создания методики обоснованного выбора метода и инструмента выполнения контрольно-измерительных операций на производстве, с учетом не только технических, но и организационно-экономических параметров. Одновременное рассмотрение большого числа факторов приводит к тому, что объективность и обоснованность выбора снижается. Для решения подобных задач в ценообразовании и финансовой оценке широко применяются методы, основанные на многофакторном анализе, позволяющие не только учесть разнообразие влияющих факторов, но и построить математическую модель, обосновывающую принятие решения. К подобным методам многофакторного анализа можно отнести балльно-параметрический метод [5, 6] или метод БОФа [6, 7], позволяющие найти оптимальное решение в условиях ограниченности ресурсов. В ходе данной работы на основе методов многофакторного анализа, а также с учетом специфики контрольно-измерительных операций был разработан алгоритм выбора метода контроля геометрических размеров деталей при производстве геодезической продукции. Предложенный алгоритм предполагает последовательное выполнение шести описанных ниже этапов.

Этап 1. Выявление методов, наиболее часто применяющихся для решения поставленной задачи.

В рамках данного этапа проводятся поисковые научно-исследовательские работы, результатом которых является перечень используемых в настоящее время инструментов, методов решения поставленной задачи.

Этап 2. Определение параметров для оценки.

Учитывая неоднородность задач, объектов исследования, организационно-экономических и технико-технологических условий функционирования предприятия выбираются параметры, наиболее важные при принятии решений. Учиты-

вая опыт проведенных исследований, необходимо отметить, что в число параметров должны входить как технические, так и организационно-экономические, так как такой симбиоз дает возможность комплексной оценки предлагаемых методов.

Этап 3. Балльная оценка выбранных методов согласно параметрам, определенным на этапе 2.

Необходимо отметить, что балльная оценка позволяет включать в список анализируемых параметров как измеримые (скорость, погрешность и т.д.), так и неизмеримые (эргономичность, доступность технологии или оборудования и т.д.), что, в свою очередь, повышает надежность результатов. Балльная шкала выбирается единая для всего спектра анализируемых параметров, но, в силу высокой трудоемкости описания, рекомендуется применять шкалу размерности от 5-ти до 10-ти баллов. Балльную оценку осуществляет экспертный совет, состав которого формируется и согласуется в зависимости от объекта оценки. Сама оценка может быть проведена по одному из методов группового принятия решений: «мозговой штурм», метод «Делфи» и т.д. [8].

Этап 4. Формирование профиля идеального метода.

Стоит отметить, что идеальный метод в данном случае воспринимается как гипотетический (несуществующий), его формирование наиболее схоже с формулировкой идеального конечного результата (ИКР) согласно теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [9]. Цель создания такого профиля – наличие базы для сравнения существующих методов с методами, максимально отвечающими потребностям заказчика.

Этап 5. Определение важности каждого из параметров.

Важность параметра может быть определена разными способами, однако, большинство из них имеют крайне низкую объективность в силу того, что объем одновременно анализируемой информации становится несоразмерно большим при увеличении числа сравниваемых параметров. Одним из инструментов в данном случае может выступать метод попарных сравнений [10]. Особенностью данного метода является сравнение не всех параметров, а только пары и выставление оценок в системе «более важный», «менее важный» или «равнозначный», что позволяет одновременно оценить объективность принятого решения, но и с применением инструментов математической статистики определить значимость всех параметров, входящих в анализируемую выборку.

Этап 6. Расчет взвешенного параметрического индекса.

Взвешенный параметрический индекс показывает, насколько анализируемый метод отвечает требованиям. Таким образом, параметрический индекс является основанием для выбора.

Формула расчета индекса:

$$J_A = \sum_{i=1}^m \left(\frac{b_i^A}{b_i^I} \cdot V_i \right), \quad (1)$$

где J_A – параметрический индекс метода A ;

i – номер анализируемого параметра;

m – число анализируемых параметров;

b_i^A – балл по « i » параметру у метода A (по результатам этапа 3);

b_i^I – балл по « i » параметру у идеального метода (по результатам этапа 4);

V_i – весомость « i » параметра (по результатам расчета этапа 5).

Таким образом, будет получен взвешенный параметрический индекс по каждому из анализируемых методов, что будет являться основанием для выбора наиболее подходящего метода измерений в сложившихся технико-технологических и организационно-экономических условиях.

Апробация предложенной методики анализа. Для апробации были выбраны контрольно-измерительные операции, необходимые согласно технологическим картам при производстве электронных тахеометров серии 6Та2, 6Та3, 6Та2 МО.

1 этап. Как уже было отмечено выше, существует ряд наиболее часто используемых методов для контроля геометрии деталей. В ходе исследования был проведен анализ каждого из приведённых методов и выявлен ряд достоинств и недостатков, приведенных в таблице 1 [11 - 15].

Таким образом, можно сделать вывод, что простой анализ предлагаемых методов не дает однозначного ответа, какой из них будет максимально соответствовать требованиям конкретного производственного подразделения и технологического процесса. Однако, для анализа по предложенному алгоритму будем рассматривать все 5 описанных методов.

2 этап. Для определения параметров оценки была собрана экспертная группа, в которую входили представители отдела главного технолога, метрологи, экономисты, представители производственного подразделения (в котором будут проводиться контрольно-измерительные операции), исследователи (занимающиеся разработками в области метрологии).

Формирование списка параметров проводилось в два этапа:

1. Участникам были предложены опросные листы с открытыми вопросами, касающимися особенностей производственного процесса и применяемых (планируемых) технологий и методов труда.

2. Проведение мозгового штурма, в рамках которого обсуждались все предложенные варианты, и выработан общий список.

Ниже представлена часть предложенного списка параметров, подлежащих сравнению:

- скорость измерений;
- погрешность измерений;
- возможность измерения сложной геометрии изделия;
- необходимость использования дополнительных материалов (спреев, смазок, экранов и т.д.);
- стоимость оборудования;
- необходимость модернизации производственного помещения;
- возможность получения цифровой модели объекта в ходе измерений;
- и т.д.

3 этап. Для выбранных параметров была сформирована таблица с исходными значениями (таблица 2), на основе которой были проставлены баллы (таблица 3). В таблицах 2 и 3 приведена часть данных.

Для балльной оценки применена 10-ти балльная система оценивания. Процесс оценки проходил по «методу Дельфи»: респондентам из группы были предложены оценочные листы для индивидуального заполнения; баллы вносились в итоговый формуляр при условии их совпадения; при несовпадении баллов более чем на 2 единицы вопрос выносился на обсуждение.

4 этап. По итогам работы экспертной группы был сформирован профиль идеального метода, полностью отвечающего всем требованиям как технико-технологического, так и организационно-экономического обоснования. По всем параметрам данный метод получил оценку в 10 баллов. Стоит отметить, что балльный метод является гипотетическим и необходим в предлагаемой методике для относительной оценки других методов, участвующих в исследовании.

5 этап. Для определения веса каждого из параметров была сформирована матрица попарных сравнений (табл. 4). Для формирования данной матрицы проводится попарная оценка параметров, выявляется более важный в сравниваемой паре, при равнозначности параметров ставится знак « $\approx$ ».

Таблица 1

Достоинства и недостатки методов для контроля геометрии деталей

№	Метод	Достоинства	Недостатки
1	Контактный метод	1. Возможность применения совместно с координатно-измерительной машиной. 2. Цифровая обработка контактных измерений. 3. Погрешность измерений $\pm 0,0003$ мм. 4. Относительно небольшая стоимость измерений.	1. Снижение точности при близко расположенных микронеровностях. 2. Зависимость результатов от геометрии щупа и характера поверхности. 3. Небольшая скорость измерений. 4. Высокая погрешность измерения сложнопрофильных конструкций. 5. Невозможность применения при высоких температурах. 6. Небольшая скорость выполнения операций.
2	Коноскопический метод	1. Возможность работы с объектами сложной геометрической конфигурации. 2. Погрешность измерений $\pm 0,00015$ мм.	1. Сложность измерения поверхности с резкими перепадами высот. 2. Относительно невысокая скорость измерений. 3. Погрешность измерений $\pm 0,020$ мм. 4. Сложность и дороговизна внедрения. 5. Необходимость нанесения специального спрея для достижения необходимой погрешности измерений.
3	Интерференционный метод	1. Высокая чувствительность к топографии поверхности. 2. Минимальный риск деформации исследуемой поверхности. 3. Возможность исследования больших поверхностей. 4. Получение трехмерной модели исследуемого объекта. 5. Погрешность измерений $\pm 0,0001$ мм.	1. Сложность конструкции аппарата для измерений. 2. Достаточно высокая стоимость как оборудования, так и измерений. 3. Необходимость использования специального спрея для достижения необходимой погрешности измерений.
4	Метод контроля профиля на основе технологии лидар	1. Высокая скорость измерений. 2. Достаточно высокая точность измерений. 3. Погрешность измерений $\pm 0,005$ мм.	1. Достаточно высокая стоимость как оборудования, так и измерений. 2. Эффективен для достаточно крупных метрических объектов. 3. Невозможно использовать для оценки внутренних поверхностей объекта.
5	Методы с применением лазерных триангуляционных сканеров	1. Возможность измерения объектов со сложной геометрией. 2. Погрешность измерений до $0,0039$ мм.	1. Чувствительность оборудования к внешним помехам. 2. Необходимость использования дополнительных элементов, противостоящих засветке. 3. Чувствительность к температурному режиму работы. 4. Невозможность работы при интерференции света от соседних элементов объекта.

Таблица 2

Исходные значения параметров

№	Параметры	Методы				
		Контактный	Коноскопический	Интерференционный	На основе технологии лидар	На основе лазерных триангуляционных сканеров
1	Скорость измерений	средняя	низкая	высокая	средняя	средняя
2	Погрешность измерений, мм	$\pm 0,0003$	$\pm 0,00015$	$\pm 0,0001$	$\pm 0,005$	$\pm 0,0039$
3	Возможность измерения сложной геометрии изделия	Высокая погрешность	да	Высокая погрешность	Высокая погрешность	да
4	Необходимость использования дополнительных материалов	нет	да	да	нет	да
....			...	...	...	...
n	Необходимость модернизации производственного помещения	нет	нет	да	да	да

Таблица 3

Результаты оценки методов

№	Параметры	Методы				
		Контактный	Коноскопический	Интерференционный	На основе технологии лидар	На основе лазерных триангуляционных сканеров
1	Скорость измерений	8	6	10	7	8
2	Погрешность измерений	8	6	8	10	8
3	Возможность измерения сложной геометрии изделия	8	10	6	5	10
4	Необходимость использования дополнительных материалов	10	4	4	10	2
...		...	...	...	...	...
n	Необходимость модернизации производственного помещения	10	8	4	6	2

Таблица 4

Матрица попарных сравнений (часть)

Параметры	Скорость измерений	Погрешность измерений	Возможность измерения сложной геометрии изделия	Необходимость использования дополнительных материалов	Необходимость модернизации производственного помещения
Скорость измерений	=	<	<	<	<
Погрешность измерений	>	=	>	=	=
Возможность измерения сложной геометрии изделия	>	<	=	=	>
Необходимость использования дополнительных материалов	>	=	<	=	=
.....	...	...	...	...	...
Необходимость модернизации производственного помещения	>	=	<	=	=

Далее строится квадратная матрица:

$$A = |a_{ij}|, \quad (2)$$

где i – номер строки;
 j – номер столбца.

$$a_{ij} = 1 + y, \text{ если } x_i > x_j, \quad (3)$$

$$a_{ij} = 1 - y, \text{ если } x_i < x_j, \quad (4)$$

$$a_{ij} = 1, \text{ если } x_i = x_j. \quad (5)$$

Примем $y=1$.

С учетом описанных допущений матрица парных сравнений получит вид как в таблице 5.

Далее в расчет вводится понятие «итерированная сила» порядка K параметров в виде матрицы-столбца $P(K)$, которая определяется в общем случае, как

$$P(K) = AP(K-1), \quad (6)$$

где $K = 1, 2, \dots, m$.

Итерированная сила объекта x_i определяется, как произведение строки матрицы A на столбец матрицы $P(K)$ по формуле:

$$P_{i(k)} = \sum_{j=1}^m a_{ij} P_{j(k-1)}. \quad (7)$$

В начале расчета принимается итерированная сила $P(K) = 1$, то есть для определения $P1(K)$ берется $P1(0) = 1$:

$$P(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Таблица 5

Числовое значение матрицы попарных сравнений

Параметры	Скорость измерений	Погрешность измерений	Возможность измерения сложной геометрии изделия	Необходимость использования дополнительных материалов	Необходимость модернизации производственного помещения
Скорость измерений	1	0	0	0	0
Погрешность измерений	2	1	2	1	1
Возможность измерения сложной геометрии изделия	2	0	1	1	2
Необходимость использования дополнительных материалов	2	1	0	1	1
...	...	...	...	...	...
Необходимость модернизации производственного помещения	2	1	1	0	1

Исходную матрицу A умножаем на $P(0)$, далее процесс повторяется с учетом полученной итерированной силы на предыдущем этапе. Практическую ценность в данном методе представляет так называемая нормированная итерированная сила k -го порядка i -го параметра $P_i^{\text{отн}}$

(k), именно она трактуется как значение коэффициента весомости i -го параметра. В данном исследовании оценка важности параметров определяется по описанной выше математической модели, результаты оценки приведены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты оценки важности параметров

№	Параметры	Важность
1	Скорость измерений	0,037
2	Погрешность измерений	0,201
3	Возможность измерения сложной геометрии изделия	0,152
4	Необходимость использования дополнительных материалов	0,135
...	...	...
n	Необходимость модернизации производственного помещения	0,115

6 этап. На данном этапе был рассчитан взвешенный параметрический индекс по каждому

анализируемому методу согласно формуле, приведенной в описании шестого этапа методики. Результаты оценки приведены в таблице 7.

Таблица 7

Расчет взвешенного параметрического индекса

№	Параметры	Важность	Параметрический индекс по каждому методу				
			Контактный	Конускопический	Интерференционный	На основе технологий лидар	На основе лазерных триангуляционных
1	Скорость измерений	0,037	0,8	0,6	0,7	1	0,8
2	Погрешность измерений	0,201	0,8	0,6	0,8	1	0,8
3	Возможность измерения сложной геометрии изделия	0,152	0,8	1	0,6	0,5	1
4	Необходимость использования дополнительных материалов	0,135	1	0,4	0,4	1	0,2
...	...	...	...	...	...	...	...
n	Необходимость модернизации производственного помещения	0,115	1	0,8	0,4	0,6	0,2
	Взвешенный параметрический индекс		0,64	0,48	0,44	0,53	0,41

На основе полученных расчетов можно сделать вывод, что наиболее подходящим в сложившихся технико-технологических и организационно-экономических условиях будет контактный метод измерений. Необходимо отметить, что полученный результат сравнительной оценки методов проведения контрольно-измерительных операций получен в ходе поэтапной работы с данными и экспертным сообществом, что не только повышает уровень обоснованности решения, но и снижает влияние субъективных факторов при анализе и принятии решения.

Дискуссия и выводы. Приведенный алгоритм выбора наиболее подходящего метода проведения контрольно-измерительных операций учитывает максимально количество параметров при анализе, а также позволяет включать как технические, так и организационные факторы, что, несомненно, повышает эффективность и релевантность результата. Также стоит отметить, что данный метод универсален и может быть использован для любого объекта при изменении параметров анализа. Математический механизм, заложенный в процесс определения значимости параметров, позволяет оптимизировать процесс оценки, как на балльном уровне, так и при определении значимости параметров по сравнению друг с другом. Однако, одним из немаловажных моментов является необходимость привлечения экспертного сообщества для выполнения первых трех этапов, что повышает риск субъективности оценки. Особое внимание стоит уделять формированию экспертной комиссии, а также привлекать модераторов для минимизации влияния наиболее опытных членов сообщества на мнение большинства.

Источник финансирования. Настоящее исследование выполнено научно-конструкторским бюро гражданского приборостроения акционерного общества «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» по соглашению №16 о реализации комплексного проекта «Модернизация и внедрение в промышленное производство методики и технологических процессов для контроля геометрические размеров с целью увеличения объёмов и номенклатуры выпускаемых геодезических изделий» от 22.05.2023г. между АО «ПО «УОМЗ» и фондом технологического развития промышленности Свердловской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сеница М.О., Осипов Т.А., Комшин А.С. Разработка технических средств контроля геометрии изделий общего и тяжелого машиностроения // Приборы. 2022. № 11 (269). С. 14–21.
2. Лексутов И.С., Клюка В.П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 51–63.
3. Голубева О.А., Мирный В.И., Фоменко О.Н. Анализ применения координатно-измерительных машин при производстве сельскохозяйственной техники // Прогрессивные технологии и процессы : сборник научных статей 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 50–53.
4. Чепчуров М.С., Сумской А.М., Жигулина Ю.А., Подпрятков Д.В. Идентификация искажения формы цилиндрических деталей технологических агрегатов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 4 (18). С. 29–36. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-29-36
5. Кузнецова Е.Ю., Подоляк О.О., Минина Е.В. Ценообразование промышленной продукции при выведении на рынок // На страже экономики. 2022. № 4 (23). С. 79–92. DOI: 10.36511/2588-0071-2022-4-79-92.
6. Загодарчук И.В., Загодарчук И.Б. Виды экономико-математических моделей и методов, используемых в ценообразовании научно-технической продукции // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2019. № 2 (2). С. 340–346.
7. Быстров О.Ф. Метод принятия решения в задачах выбора на множестве альтернатив по множеству показателей – метод БОФЭм // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2018. № 3 (19). С. 12–18. DOI: 10.24151/2409-1073-2018-3-12-18
8. Кудряшов В.С., Андрианова Д.Д. Групповые решения и групповое мышление в системе методов принятия управленческих решений // Экономика и управление народным хозяйством (Санкт-Петербург). 2021. № 16 (18). С. 141–147.
9. Умаржанов А.А., Абдуллозода Б.Х. Использование современной теории решения изобретательских задач для разработки эффективных инженерных конструкций // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 217–222.
10. Prilytskaya M.A., Murukina A.D., Podoliak O.O. Operation of high-technology product development based on functions and value // International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2019, ICMTME 2019. Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 033049. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033049

11. Lavrinov D.S., Khorkin A.I., Privalova E.A. Comparative analysis of automatic methods for measuring surface of threads of oil and gas pipes // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. Vol. 641 LNEE. Pp. 83–96. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_11

12. Li X., Li W., Xin H., Zhou J., Chen H., Chen X., Yin X., Yuan X., Ma X. Single-lens multi-mirror laser stereo vision-based system for measuring internal thread geometrical parameters // Opt. Express. 2022. №30. Pp. 47625–47646 DOI: 10.1364/OE.476796.

13. Wu Z.G., Lin Ch.Y., Chang H.W., Lin P.T. Inline inspection with an industrial robot (IIIR) for mass-customization production line // Int J Mech Prod Eng Res Dev Karnataka. 2020. №20 (11). 3008. DOI: 10.3390/s20113008.

14. Бельский А.Б., Ресинец А.И., Ресинец А.А., Степанов Н.И. Сравнительный анализ основных методов и средств измерения геометрии изделий и деталей авиационной техники // Качество и жизнь. 2023. № 2 (38). С. 60–67. DOI: 10.34214/2312-5209-2023-38-2-60-67.

15. Bebikhov Y.V., Podkamenniy Y.A., Golikov V.V., Spiridonov V.M. On the issue of complex automation of mining operations in the diamond mining industry // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FAREASTCON 2020. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. 9271623. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271623.

Информация об авторах

Искачёв Сергей Анатольевич, руководитель программ. E-mail: mail@uomz.com. Уральский оптико-механический завод. Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33 Б.

Совков Александр Николаевич, главный метролог. E-mail: mail@uomz.com. Уральский оптико-механический завод. Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33 Б.

Яркин Андрей Леонидович, заместитель главного технолога. E-mail: mail@uomz.com. Уральский оптико-механический завод. Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33 Б.

Подольяк Ольга Олеговна, кандидат экономических наук, доцент кафедры организации машиностроительного производства. E-mail: o.o.podoliak@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Овчинникова Валентина Андреевна, директор Уральской передовой инженерной школы. E-mail: ova@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Лавринов Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи. E-mail: d.s.lavrinov@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Поступила 04.09.2023 г.

© Искачёв С.А., Совков А.Н., Яркин А.Л., Подольяк О.О., Овчинникова В.А., Лавринов Д.С., 2023

¹Iskachev S.A., ¹Sovkov A.N., ¹Yarkin A.L., ²*Podoliak O.O., ²Ovchinnikova V.A.,
²Lavrinov D.S.

¹Ural Optical and Mechanical Plant

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

*E-mail: o.o.podoliak@urfu.ru.

SELECTION OF A METHOD FOR CONTROLLING THE GEOMETRIC DIMENSIONS OF PARTS IN GEODETIC PRODUCTION

Annotation. An important aspect in the production of geodetic equipment is the control and measurement of parts of the entire unit. The problem of choosing the method for controlling the geometric dimensions of parts in the production of geodesic products is raised. Simple analysis and further choice of control method do not give a clear answer which method will best suit the requirements of a particular production unit and technological process. The researchers developed an algorithm for selecting a method for controlling the geometric dimensions of parts, consisting of 6 steps. For approbation of the proposed method of analysis control and measuring operations necessary according to technological maps in the production of electronic total

stations were considered. The advantages of the algorithm presented are the consideration of the maximum number of parameters in the analysis, taking into account both technical and organizational factors. This method can be used for any object when changing the analysis parameters. The study tested the algorithm for the analysis of the most popular control methods. The first three steps of the algorithm require the formation of an expert commission, which can add subjectivity to the evaluation of the parameters of the analysis. The final steps of the control method selection algorithm are calculated. The result of the proposed method is the calculation of a weighted parametric index.

Keywords: control method, geodetic products, control and measurement operations, measurement accuracy.

REFERENCES

1. Sinica M.O., Osipov T.A., Komshin A.S. Development of technical means of geometry control of products of general and heavy engineering [Razrabotka tekhnicheskikh sredstv kontrolya geometrii izdelij obshchego i tyazhelogo mashinostroeniya]. *Pribory*. 2022. No. 11 (269). Pp. 14–21. (rus)
2. Leksutov I.S., Klyuka V.P. To the possibility of using a linear scanner to create means of technical control of geometric parameters of the longitudinal section of the rolling surface of the railcar wheel [K vozmozhnosti primeneniya linejnogo skanera dlya sozdaniya sredstv tekhnicheskogo kontrolya geometricheskikh parametrov prodol'nogo secheniya poverhnosti kataniya kolesa vagona]. *Journal of Transsib railway studies*. 2022. No. 3 (51). Pp. 51–63. (rus)
3. Golubeva O.A., Mirny V.I., Fomenko O.N. Analysis of the application of coordinate measuring machines in the manufacture of agricultural machinery [Analiz primeneniya koordinatno-izmeritel'nyh mashin pri proizvodstve sel'skohozyajstvennoj tekhniki]. *Progressivnye tekhnologii i processy : sbornik nauchnykh statej 6-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Kursk: YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet*. 2019. Pp. 50–53. (rus)
4. Chepchurov M.S., Sumskoi A.M., Jigulina Yu.A., Podpriatov D.V. Distortion identification of the cylindrical part form of technological units [Identifikaciya iskazheniya formy cilindricheskikh detalej tekhnologicheskikh agregatov]. *Automation and modeling in design and management*. 2022. No. 4 (18). Pp. 29–36. (rus) DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-29-36
5. Kuznetsova E.Yu., Podoliak O.O., Minina E.V. Pricing of industrial products when entering the market [Cenoobrazovanie promyshlennoj produkcii pri vyvedenii na rynek]. *The economy under guard*. 2022. No. 4 (23). Pp. 79–92. (rus) DOI: 10.36511/2588-0071-2022-4-79-92
6. Zagodarchuk I.V., Zagodarchuk I.B. Types of economic and mathematical models and methods used in the pricing of scientific and technical products [Vidy ekonomiko-matematicheskikh modelej i metodov, ispol'zuemyh v cenoobrazovanii nauchno-tekhnicheskoy produkcii]. *Actual problems of military scientific research*. 2019. No. 2 (2). Pp. 340–346. (rus)
7. Bystrov O.F. Decision-making technique in selection tasks on the set of alternatives on the set of indicators - the BOFem method [Metod prinyatiya resheniya v zadachah vybora na mnozhestve al'ternativ po mnozhestvu pokazatelej - metod BOFem]. *Economical and social-humanitarian research*. 2018. No 3 (19). Pp. 12–18. (rus) DOI: 10.24151/2409-1073-2018-3-12-18
8. Kudryashov V.S., Andrianova D.D. Group decisions and group thinking in the system of methods for making management decisions [Gruppovye resheniya i gruppovoe myshlenie v sisteme metodov prinyatiya upravlencheskikh reshenij]. *The national economy and management (Saint-Petersburg)*. No. 16 (18). Pp. 141–147. (rus)
9. Umarzhanov A.A., Abdullozoda B.Kh. The use of the modern theory of inventive problem solving to develop effective engineering designs [Ispol'zovanie sovremennoj teorii resheniya izobretatel'skikh zadach dlya razrabotki effektivnyh inzhenernykh konstrukcij]. *Modern science-intensive technologies*. 2019. No. 6. Pp. 217–222. (rus)
10. Prilytskaya M.A., Murukina A.D., Podoliak O.O. Operation of high-technology product development based on functions and value. *International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2019, ICMTME 2019. Sevastopol: Institute of Physics Publishing*, 2020. 033049. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033049.
11. Lavrinov D.S., Khorkin A.I., Privalova E.A. Comparative analysis of automatic methods for measuring surface of Lavrinov D.S., Khorkin A.I., Privalova E.A. Comparative analysis of automatic methods for measuring surface of threads of oil and gas pipes // *Lecture notes in electrical engineering*. 2020. Vol. 641. LNEE. Pp. 83–96. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_11.
12. Li X., Li W., Xin H., Zhou J., Chen H., Chen X., Yin X., Yuan X., Ma X. Single-lens multi-mirror laser stereo vision-based system for measuring internal thread geometrical parameters // *Opt. Express*. 2022. No. 30. Pp. 47625–47646 DOI: 10.1364/OE.476796.
13. Wu Z.G., Lin Ch.Y., Chang H.W., Lin P.T. Inline inspection with an industrial robot (IIIR) for

mass-customization production line // Int J Mech Prod Eng Res Dev Karnataka. 2020. No. 20 (11). 3008. DOI: 10.3390/s20113008.

14. Belsky A.B., Resenets A.I., Resenets A.A., Stepanov A.A. Comparative analysis of basic methods and means of measuring the geometry of products and parts of aircraft technology [Srovnitel'nyj analiz osnovnykh metodov i sredstv izmereniya geometrii izdelij i detalej aviacionnoj tekhniki]. Quality and life. 2023. No. 2 (38). Pp. 60–67. DOI: 10.34214/2312-5209-2023-38-2-60-67. (rus)

Information about the authors

Iskachev, Sergey A. E-mail: mail@uomz.com. Ural Optical and Mechanical Plant. Russia, 620100, Ekaterinburg, st. Vostochnaya, 33 B.

Sovkov, Alexander N. E-mail: mail@uomz.com. Ural Optical and Mechanical Plant. Russia, 620100, Ekaterinburg, st. Vostochnaya, 33 B.

Yarkin, Andrey L. E-mail: mail@uomz.com. Ural Optical and Mechanical Plant. Russia, 620100, Ekaterinburg, st. Vostochnaya, 33 B.

Podolyak, Olga O. PhD. E-mail: o.o.podoliak@urfu.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Ovchinnikova, Valentina A. E-mail: ova@urfu.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Lavrinov, Dmitry S. E-mail: d.s.lavrinov@urfu.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Received 04.09.2023

Для цитирования:

Искачёв С.А., Совков А.Н., Яркин А.Л., Подоляк О.О., Овчинникова В.А., Лавринов Д.С. Выбор метода контроля геометрических размеров деталей при производстве геодезической продукции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 102–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-102-111

For citation:

Iskachev S.A., Sovkov A.N., Yarkin A.L., Podolyak O.O., Ovchinnikova V.A., Lavrinov D.S. Selection of a method for controlling the geometric dimensions of parts in geodetic production. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 102–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-102-111