

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

5

2022

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**

№ 5, 2022 год

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

Vol. 5. 2022

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)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки) (до 16.10.2022)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки) (до 16.10.22)

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 Свидетельство 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	11.05.2022
Выход в свет	26.05.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 15,13. Тираж 40 экз. Заказ № 41

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)
- 05.02.13 – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences) (to 16.10.2022)
- 05.17.06 – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences) (to 16.10.2022)

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:	11.05.2022

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики 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, член-корр. 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).

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

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).

Гридчин Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф., Президент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

Леонovich Сергей Николаевич, иностранный член 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).

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

Мещерин 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., директор института химических технологий, 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., и.о. директора 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 мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия 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).

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

Смоляго Геннадий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры строительства и городского хозяйств 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).

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).

Шاپовалов 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, Corresponding member 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).

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

Vasiliy 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).

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

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

Anatoliy M. Gridchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Aleksey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Director NII ZHB named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (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).

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).

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

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

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

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

Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЦИКЛИРУЕМОЙ
ШУМОЗАЩИТНОЙ ПАНЕЛИ 8

Сулейманов К.А., Погорелова И.А., Рябчевский И.С.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ СТЕН
ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ 17

Гайнетдинов Р.Г., Гимранов Л.Р., Сибгатуллин М.Т.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТЕНКИ ТОНКОСТЕННЫХ
ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ЧАСТЬЮ В БОЛТОВЫХ
УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ 25

Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ В ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ 33

Логинова Ю.А.

ИСТОРИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕМОНТНО-РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ
АРХИТЕКТУРНОГО КОМПЛЕКСА ДОНСКОГО МУЖСКОГО
МОНАСТЫРЯ В 2013–2021 ГГ. 41

Бергман А.В.

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ
СТАНИЦЫ СТАРОЧЕРКАССКОЙ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ 50

Воронина О.С.

КАРТОГРАФИЯ СИБИРИ XVII–XX В.: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ
И МЕТОДИКА РАБОТЫ С КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ 60

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ПРОДУКТА
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ В КАЧЕСТВЕ
МИНЕРАЛИЗАТОРА ПРИ ОБЖИГЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА 71

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Бухаров К.Д., Гришин Н.А., Кудров М.А., Рыбак Л.А., Черкасов В.В.

АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ШЕСТИСТЕПЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ
ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ И ТРЕНАЖЕРОВ 81

**Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д.,
Мелентьев Н.А.**

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ
ДЕТАЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С АДДИТИВНОЙ И СУБТРАКТИВНОЙ
ТЕХНОЛОГИЯМИ 91

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Nakhaev M.R., Salamanova M.S. MATERIALS AND TECHNOLOGY FOR OBTAINING A RECYCLED NOISE PROTECTION PANEL	8
Suleymanov K.A., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. INCREASING THE THERMAL UNIFORMITY OF WALLS MADE OF CELLULAR CONCRETE BLOCKS	17
Gainetdinov R.G., Gimranov L.R., Sibgatullin M.T. ON THE QUESTION OF ESTIMATION OF THE WALL DEFORMABILITY OF THIN-WALL COLD FORMED PROFILES WITH A TRAPEZOID PART IN BOLT NODAL JOINTS	25
Vorobyova Y.A., Mikhailova T.V., Burak E.E. DIGITAL SIMULATION OF WIND FLOWS IN RESIDENTIAL BUILDINGS	33
Loginova Y.A. THE HISTORY OF THE REPAIR AND RESTORATION WORKS OF THE ARCHITECTURAL COMPLEX OF THE DONSKOY MONASTERY IN 2013-2021	41
Bergman A.V. HISTORICAL ASPECTS OF FORMATION OF THE COASTAL AREA OF STANITSA STAROCHERKASSKAYA (COSSACK VILLAGE) IN THE ROSTOV REGION	50
Voronina O.S. CARTOGRAPHY OF SIBERIA OF THE XVII -XX CENTURIES: RESEARCH POTENTIAL AND METHODS OF WORKING WITH CARTOGRAPHIC INFORMATION	60

CHEMICAL TECHNOLOGY

Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Vasina Yu.A. EFFICIENCY OF USING A TECHNOGENIC PRODUCT OF ELECTROLYTIC PRODUCTION OF ALUMINUM AS A MINERALIZER WHEN FIRING PORTLAND CEMENT CLINKER	71
---	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Bukharov K.D., Grishin N.A., Kudrov M.A., Rybak L.A., Cherkasov V.V. KINEMATICS ANALYSIS OF A 6-DOF ROBOTIC MOBILITY PLATFORM FOR TEST BENCHES AND SIMULATORS	81
Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tikhonov A. A., Antsiferov S.I., Gerasimov M.D., Melentiev N.A. EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPOSITE METAL-METAL-POLYMER PARTS IN COMPARISON WITH ADDITIVE AND SUBTRACTIVE TECHNOLOGIES	91

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-8-16

^{1,2}Нахаев М.Р., ^{2,3,*}Саламанова М.Ш.¹Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова²Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова³Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук

*E-mail: madina_salamanova@mail.ru.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЦИКЛИРУЕМОЙ ШУМОЗАЩИТНОЙ ПАНЕЛИ

Аннотация. В мире насчитываются десятки тысяч километров шумозащитных экранов вдоль автомобильных и железных дорог и вблизи аэропортов. Применение экранов выявило их недостатки. Нередко экраны не обеспечивают требуемого звукопоглощения, обладают низкой долговечностью. Экраны могут быть как шумопоглощающие и шумоотражающие, так и комбинированные. Для поглощения шума на средних и высоких частотах применяются звукопоглощающие материалы. Для звукопоглощения на низких частотах применяются резонансные поглотители, они представляют собой резонаторы Гельмгольца, объединенных в единую конструкцию. Когда жизненный цикл панелей оканчивается, они должны быть рециклированы. Разделить дерево, металл, плиты из стекловолокна или минеральной ваты, завернутые в стеклоткань, не так просто. Для производства минерального волокна расходуется большое количество энергии. Предложена подборка материалов и исследованы свойства мелкозернистых бетонов для дальнейшего изготовления шумозащитной панели. Перфорированная передняя и глухая задняя стенки делаются из мелкозернистого базальтофибробетона, для армирования которого используются щелочестойкие базальтовые волокна. Полученные результаты исследований мелкозернистого базальтового бетона подтвердили эффективность комплексного использования базальтовых волокон и суперпластификатора Master Glenium 115. Физико-механические характеристики базальтофибробетона сопоставимо с традиционным бетоном возросли примерно на 70–80 %, что позволит в дальнейшем повысить долговечность моделируемых шумоизоляционных панелей.

Ключевые слова: шумозащитная панель, автомобильная магистраль, перлитобетон, фибры, базальтовые волокна, перекати-поле, рециклинг, энергетический переход.

Введение. В мире насчитываются многие десятки тысяч километров шумозащитных экранов вдоль автомобильных и железных дорог и вблизи аэропортов и предприятий, работа которых сопровождается излучением шума. Исследования шумозащитных экранов были начаты за рубежом в 1960-х годах, тогда же там появились первые шумозащитные ограждения. В нашей стране шумозащитные экраны массово начали применяться только в 1990-х годах. Применение экранов выявило ряд существенных их недостатков. Например, экраны из тонколистовой оцинкованной стали, давно не применяемые за рубежом, быстро выходят из строя из-за коррозии, особенно возле автомобильных дорог из-за выхлопных газов [1]. Нередко экраны не обеспечивают требуемых звукоизоляции и звукопоглощения, их стоимость достаточно высока.

По своим свойствам шумозащитные экраны могут быть как шумопоглощающие, шумоотражающие, так и комбинированные. Для поглощения шума на средних и высоких частотах применяются различные звукопоглощающие матери-

алы. Для достижения звукопоглощения на низких частотах применяются резонансные поглотители, они представляют собой совокупность резонаторов Гельмгольца, объединенных в единую конструкцию [2, 3]. В качестве примера одной из конструкций шумозащитной панели, из которых собираются шумозащитные экраны, рассмотрим следующий образец [4].

Панель имеет каркасную основу из деревянных импрегнированных брусков (специальная пропитка дерева, что увеличивает его срок службы). Пространство между лицевой и задней стенками содержит шумопоглотитель и воздушную полость, в которой размещены диагонально ребра жесткости.

В качестве звукопоглощающего материала используются плиты из минеральной ваты на базальтовой основе типа «Rockwool», или минеральной ваты типа «URSA», или базальтовой ваты типа П-75 (объемной плотностью 75 кг/м³), или стекловаты с облицовкой стекловолоком, причем звукопоглощающий элемент по всей своей поверхности облицован акустически прозрачным материалом, например, стеклотканью

типа ЭЗ-100 [5]. Шумопоглощающие плиты обычно имеют толщину от 50 до 100 мм. Лицевая обшивка выполнена в виде сетки и прижимной

решетки с горизонтальными рейками длиной, равной ширине панели. Рейки установлены со щелевым зазором.



Рис. 1. Шумозащитное ограждение железной дороги.

(Источник <https://acousticshield.doorhan.ru/upload/iblock/f3f/f3f1d49f1054252bbd67aa66394ee9e7.pdf>)

Зазор между рейками в решетке определяется как функция от частоты акустической волны. Расчет проводят по известной формуле, приведенной в [4]:

$$d = [0,14 f L (h \cdot l)^{1/2}] / c, \quad (1)$$

где d – величина зазора между планками лицевой решетки, м; f – резонансная частота, Гц; L – ширина рейки, м; h – расстояние между задней внутренней стенкой короба и шумопоглощающей плитой, м; l – длина щели, м; c – скорость звука в воздухе при 20 °С.

Итак, в зависимости от доминирующих частот, излучаемой источником шума, которые нужно уменьшить, и в зависимости от размеров некоторых элементов панели, определяют величину зазоров между планками на прижимной решетке. В сочетании с шумопоглотителем и воздушной полостью внутри устройства, панель работает как резонатор Гельмгольца, обеспечивая шумопоглощение определенного спектра акустических волн. Эта панель хороша против источника шума с постоянным спектром акустических волн с явно выраженным максимумом частот в излучаемом шуме. Например, от мощных трансформаторов электроподстанции, где преобладают частоты, близкие и кратные к 50 Гц или 60 Гц (для некоторых стран). Это излучает много-тонный магнитопровод трансформатора вследствие магнитострикции. Проверка по формуле (1) показывает, что прижимная лицевая решетка, собранная из лицевых реек при толщине деревянной планки 20 мм, при ширине планки 50 мм и при ширине зазора 1 мм способна поглощать

волну с частотой 157 Гц, создаваемой трансформаторными подстанциями, установленными в городской черте.

Когда жизненный цикл шумозащитных панелей подходит к концу [7, 8], они должны быть рециклированы. Для них должен быть реализован один из возможных путей предотвращения попадания в отходы [9]. Для этого демонтированные старые панели должны быть переработаны и возвращены к использованию в качестве сырьевых материалов. Разделить дерево, резину, металлический крепеж, плиту из стекловолокна или минеральной ваты, завернутую в стеклоткань или стекловолокно не так просто.

На производство минерального волокна расходуется большое количество энергоресурсов. На сегодняшний день в мировой практике наибольшее распространение получили следующие печи для плавки сырья для получения минеральных волокон: шахтные печи (вагранки), работающие на достаточно дорогом коксе. Тепловой КПД шахтных печей не больше 30 %. Вагранки используются до сих пор потому, что у них выше в несколько раз производительность на единицу производственной площади, чем у других агрегатов. Если для плавки сырья используют ванныые печи, то для их работы используют мазут или природный газ. Максимальный КПД ванн печей равен 35 %. КПД электродуговых печей и электромагнитных технологических реакторов (те же электродуговые печи, но с электромагнитным перемешиванием расплава [10, 11]) до 70 %. Электрические печи потребляют самый дорогой энергоресурс – электроэнергию. Они потребляют 1300 кВт·ч на 1 т минерального расплава. Кроме

этого дуговые печи расходуют достаточно дорогие угольные электроды до 2,5 кг на одну тонну расплава. В индукционных печах плавят в основном базальт потому, что легче автоматизируются равномерная подача сырья. Это способствует получению волокна хорошего качества. Но в индукционных печах высокий расход энергии - они потребляют 5000-6000 кВт·ч на тонну расплава. Высокий расход энергии электропечами при производстве минеральных волокон, особенно базальтовых, это следствие, того что сырье нужно не только расплавить, а выдержать значительное время при высокой температуре (1500...1700 °С) для выравнивания химического состава и для гомогенизации расплава. Но чем выше температура, тем выше тепловые потери. Причем растут тепловые потери нелинейно.

В городских агломерациях, по которым проходит железнодорожная или автомобильная магистраль, для ограничения шума в жилой застройке, необходимо устанавливать шумозащитные экраны. Каждый километр таких экранов только для изготовления минерального волокна для шумозащитных панелей требует затраты энергоресурсов 500 тыс. кВт·ч, не говоря о прочих материалах, идущих на производство шумозащитных панелей.

Такие большие затраты энергии никак не согласуются с концепцией «энергетического перехода», который характеризуется масштабным расширением использования «зеленых» источников энергии и вызванной этим направлением разработкой изделий с повышенными требованиями к энерго- и материалосбережению. Возвращаясь к шумозащитным панелям, отметим, что шум может поглощать не только плита из минерального волокна или пористого материала, но сравнимый эффект можно получить, если звук внутри панели будет испытывать многочисленные отражения от большого числа препятствий с известным коэффициентом поглощения звука.

Акустические свойства панели можно определить по времени реверберации в течение, которого интенсивность звука уменьшается на 60 дБ,

то есть в 1 млн. раз по мощности или в 1000 раз по звуковому давлению [12]. Это время должно быть очень и очень мало, например, 0,5 мс и меньше. В известных конструкциях панелей звукопоглощение в пористых материалах обусловлено вязким трением в порах, внутренним трением и теплообменом в воздухе. В качестве зернистого пористого материала используют: минеральную крошку, мелкий гравий, пемзу, пеностекло, шлак, древесное волокно, минеральную вату, базальтовое волокно. В качестве вяжущего используют цемент или жидкое стекло (ОДМ 218.2.013-2011).

Вопрос в том, чем заполнять панель, чтобы материал был эффективен, дешев и легко подвергался рециклингу. В поиске решения поставленной задачи внимание привлекло то обстоятельство, что во многих странах фермеры ведут борьбу со злостным сорняком (рисунок 2), который именуется в просторечии перекаати-поле [13]. Перекаати-поле растет в степных районах и оставляет после отмирания особые образования, круглые, овальные и сухие, которые состоят из высохших частей и катаются по ветру в виде иногда довольно больших и легких шаров. Перекативаясь, одно растение может рассеять до 100 тысяч семян. Попадая в последней четверти 19 века в Америку из России вместе с семенами льна, "русская солянка" (местное название сорняка) быстро завоевала весь Запад США и юг Канады. Перекаати-поле создаёт затруднения автомобильному транспорту: в США практически все хайвеи в той или иной степени страдают от перекаати-поля. В конце лета и в осенне-зимний период скопления перекаати-поля у кустарников, деревьев и оград фермеров вызывают большие опасения у пожарных служб, потому что горят перекаати-поле как порох. В степной зоне и на юге России от перекаати-поля те же проблемы. Вообще, этот сорняк растет в Северном полушарии во всех странах на территории, расположенных южнее примерно 50° северной широты.



Рис. 2. Большую группу перекаати-поле прибило ветром к деревьям
(Источник <https://oir.mobi/675358-perekati-pole-rastenie.html>)

Материалы и методы. Конструирование отдельных деталей шумопоглощающей панели: лицевая перфорированная крышка, боковые грани изготавливают из мелкозернистого фибробетона. Проектирование рецептуры мелкозернистого бетона осуществляли экспериментальным путем, в качестве основного вяжущего применяли портландцемент АО «Чеченцемент», стабильного минералогического состава $C_3S = 59\%$; $C_2S = 16\%$; $C_3A = 8\%$ и $C_4AF = 13\%$. Заполнитель использовали фракционированный местный, смешивали мелкий кварцевый песок Червленского месторождения (45 %) с модулем круп-

ности 1,7 и мытые высевки от дробления известняка Ярыш-Мардынского месторождения с модулем крупности 3,9. Зерновой состав полученного обогащенного заполнителя определяли согласно ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. Установлено, что кривая просеивания не выходит за пределы области, ограниченной стандартом, следовательно, полученный заполнитель пригоден для бетона (рисунок 3). Физико-механические свойства бетонов определяли согласно ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам, модуль упругости с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 1.1».

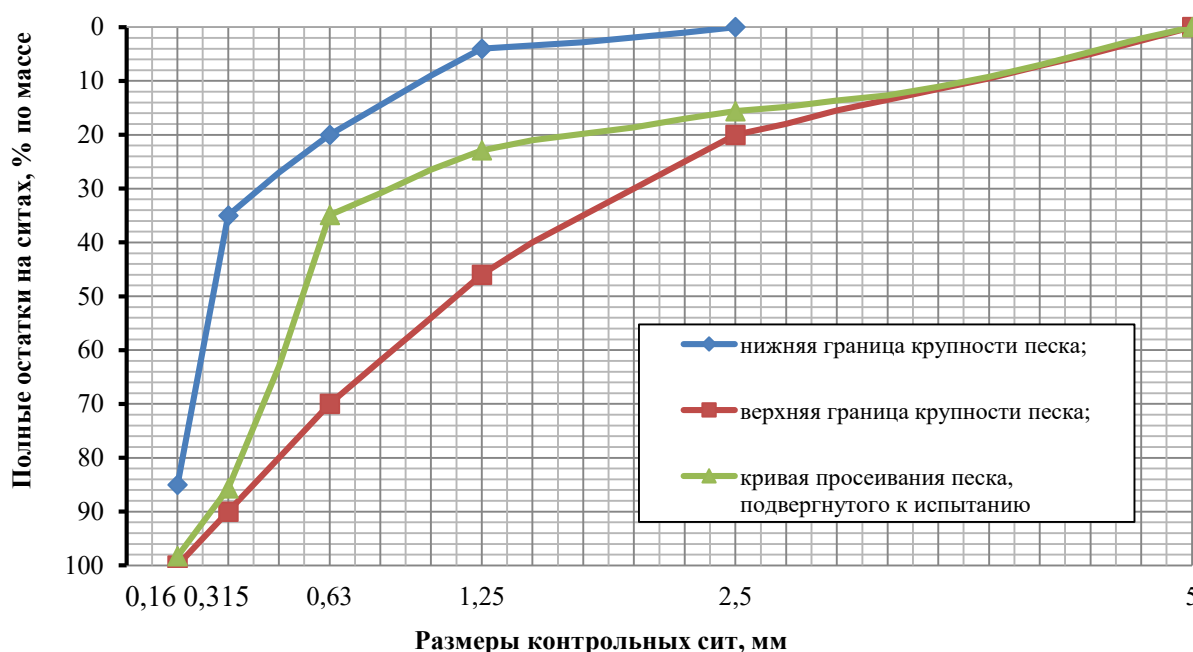


Рис. 3. Кривая просеивания фракционированного мелкого заполнителя

Для повышения трещиностойкости, акустических показателей бетонной композиции, что является обязательным требованием ограждающих конструкций использовали базальтовую фибру производства ООО «Базальтовые композиты» ТУ 5952-002-29274362-15.

На растровом электронном микроскопе QUANTA 3D 200i (США) с интегрированной системой микроанализа Genesis Apex 2 EDS от EDAX, в режиме высокого вакуума при ускоряющем напряжении электронного луча 30кВ и увеличении 250–10000 крат исследовали базальтовые фибры. Для получения изображения использовался детектор Эверхарта-Торнли (ЭТД) сцинтиляторного типа с фотоумножителем, воспринимающий вторичные (SE) и обратно-рассеянные электроны (BSE), возбуждаемые первичным пучком при его взаимодействии с образцом. Обработка спектров производилась при помощи

программного обеспечения EDAX TEAM EDS. Химический анализ базальтовой фибры в % по массе: $CO_2 = 7,16$; $Na_2O = 1,28$; $MgO = 2,61$; $Al_2O_3 = 15,47$; $SiO_2 = 52,6$; $K_2O = 1,95$; $CaO = 9,11$; $TiO_2 = 1,36$; $Fe_2O_3 = 8,46$. На микрофотографиях базальтовых фибр зафиксирован размер диаметра волокон, изменяющийся в диапазоне 10,15–11,27 мкм.

Полученная мелкозернистая композиция с использованием выше перечисленных компонентов позволит создать прочную и жесткую оболочку моделируемой рециклируемой панели.

Для обработки и упрочнения заготовленных кустов перекасти-поля была подготовлена жидкая перлитобетонная суспензия с замедленными сроками схватывания. Природный перлит - вспученный легкий материал вулканической природы с условно замкнутой пористостью, к тому же достаточно дешевый компонент, применяющийся

как звукопоглотитель и теплоизолятор. Перлит использовали производства АО «Перлит» Мухор-Талинского месторождения. Химический состав перлита % по массе: $\text{Na}_2\text{O} = 3,4$; $\text{MgO} = 0,3$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,7$; $\text{SiO}_2 = 70,4$; $\text{TiO}_2 = 0,1$; $\text{K}_2\text{O} = 3,9$;

$\text{CaO} = 0,8$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,7$; $\text{H}_2\text{O} = 5,3$; $\text{FeO} = 0,4$. Химическое взаимодействие частиц перлита с продуктами гидратации портландцементного клинкера можно выразить следующей схемой:

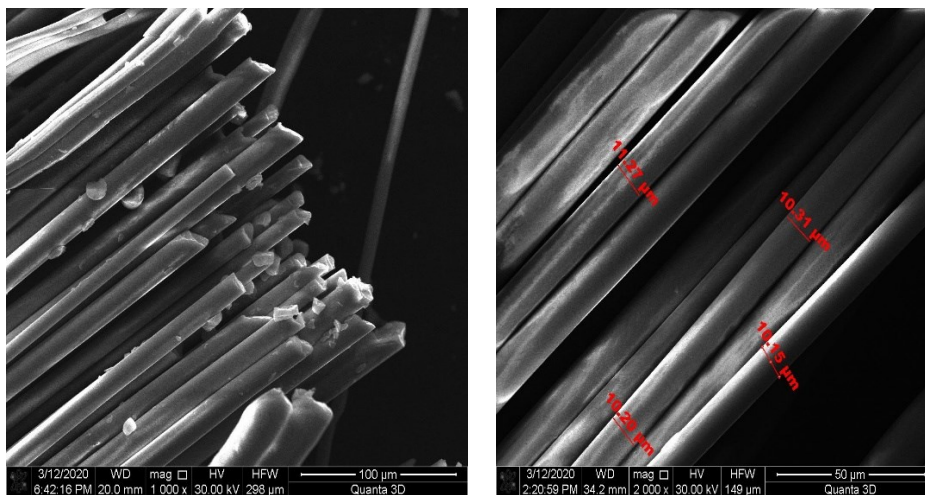
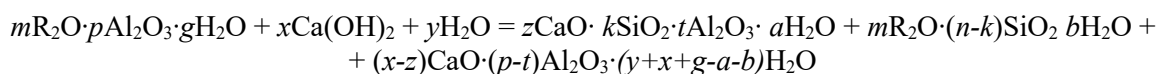


Рис. 4. Микрофотографии базальтовой фибры при различных увеличениях

В северо-западном районе Чеченской республики располагаются сухие бурунные степи, территорию которых заповили сорные растения – перекасти-поле, регион большие испытывает трудности с уничтожением данных сорняков, обладающих огромной способностью размножения. Использование перекасти-поле в строительстве для изготовления рециклируемых шумопоглощающих экранов, позволит решать ряд проблем как экологического, так и экономического характера.

Основная часть. Конструкция рециклируемой шумопоглощающей панели состоит из следующих элементов.

1. Передняя (лицевая) перфорированная крышка выполнена из мелкозернистого бетона, армированного базальтовой фиброй.

2. Плоская крышка формуется в форме из антиадгезионного материала - для формы применяют плиты из полиэтилена.

3. На днище формы расположены капроновые конусные шипы для формирования перфорации на лицевой крышке. Задняя стенка панели глухая, она толще, чем передняя из мелкозернистого фибробетона.

4. Боковины формируют в виде цельного каркаса с большими технологическими уклонами в форме, собранной из полиэтиленовых плит. Боковины панели в виде коробчатого каркаса формируют из мелкозернистого бетона с армированием волокнами базальта.

5. Заполнитель панели из кустов перекасти-поле, обработанный перлитобетонной суспензией.

Заготовленные кусты перекасти-поля в галтовочных сетчатых барабанах с крупными ячейками очищают от мелких и слабых веток и листьев. Готовят перлитобетонную жидкую, медленно твердеющую смесь, поэтому в формовочную массу добавляют замедлитель схватывания NTF в дозировке 0,3 % от массы вяжущего. Погружают в эту смесь отсортированные кусты перекасти-поля, дают стечь лишнему бетону и укладывают в готовый каркас с днищем. Сверху кусты легко подпрессовывают полиэтиленовой плитой, чтобы панель закрылась, но оставалось между ветками свободное пространство. Когда каркас с кустами, покрытыми перлитобетоном, наберет прочность, окончательно закрывают панель перфорированной крышкой. Когда панель наберет прочность ее помещают в металлический каркас, сделанный из гнутой уголком листовой нержавеющей стали или алюминия. Можно нержавеющую сталь заменить на обычную сталь, но после пескоструйной обработки в камерах и покрытия уголков горячим цинком. Сталь с цинковым покрытием, нанесенного электролизом, быстрее корродирует из-за малой толщины покрытия и микропор в нем.

Минимальное время реверберации внутри такой шумозащитной панели, заполненной шу-

мопоглощающими элементами, можно определить по немного измененной формуле Сэбина Уоллеса [14]:

$$T_{60} = 0,16V/A = 0,16V/(\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i), \quad (2)$$

где V – внутренний объем панели при условии, что часть объема панели свободна m^3 ; A – общий фонд звукопоглощения; α_i – коэффициент звукопоглощения отражающими элементами, размещенными внутри панели (зависит от материала и размера элементов, его дисперсных или фрикционных характеристик); S_i – площадь каждой отражающей звук отдельной поверхности, m^2 ; S – полная внутренняя поверхность панели, акустические свойства которой одинаковы со свойствами отражающих элементов, m^2 .

Расчет по формуле (2) показал, что время реверберации такой шумозащитной панели меньше 0,0005 с. Коэффициент звукопоглощения α_i ветками, покрытыми мелкозернистым бетоном с крупным порошком перлита, взят равным 0,06. Для приготовления смеси применяют вспученный перлит с размером частиц 0,5–3 мм [15, 16].

Подготовка к рециклингу изделий заключается в том, что с панели аккуратно снимают металлический каркас. Он после очистки и инспекции опять используется в новых панелях. Остальное запускают в дробилку. Растительные остатки от перекасти-поля после дробления панели отделяют сепарированием. Они биологически разлагаемы и удобряют почву. Дробленный мелкозернистый перлитобетон идет на производство строительных материалов.

Алгоритм процесса сборки и рециклинга шумопоглощающей панели полностью представлен, важным аспектом необходимо выделить оптимальную рецептуру мелкозернистого базальтофибробетона, являющегося корпусом данной конструкции. Составы и свойства проектируемого бетона приводятся в таблице 1. Изготовленные образцы бетона кубики размером 100мм после распалубки хранились в камере нормального твердения нормального твердения КНТ-1 и подлежали испытанию через определенные промежутки времени.

Таблица 1

Составы и свойства базальтового мелкозернистого фибробетона

№ состава	Расход материалов, кг/м ³					Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, $E \cdot 10^3$, МПа	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут.	
	ПЦ	ФЗ	В	Базальтовые фибры	Master Glenium 115			7	28
1	535	1610	165	20	4,3	2335	33,5	29,7	42,4
2	435	1740	155	21	3,5	2353	26,9	26,8	38,2
3	585	1590	175	22	4,7	2374	42,2	34,8	54,0
4	485	1590	173	–	3,7	2251	25,4	21,7	32,5
5	485	1590	192	–	–	2252	23,6	20,8	29,8

Полученные результаты исследований мелкозернистого базальтового бетона подтвердили эффективность комплексного использования базальтовых волокон и суперпластификатора (производитель BASF) Master Glenium 115 в дозировке 0,8 % от массы портландцемента. Физико-механические характеристики базальтофибробетона сопоставимо с традиционным бетоном возросли примерно на 70–80 %. Полученные составы 1 и 3 являются наиболее выгодными и позволяют повысить долговечность моделируемых шумоизоляционных панелей. Тем более следует учитывать, что заполнитель пространства панели из обработанных перлитобетоном ветвей перекасти-поле, тоже будет служит своего рода уплотнителем и шумоизолятором конструкции.

Когда жизненный цикл шумозащитных панелей заканчивается, они должны быть рециклированы. Разделить дерево, резину, металл, плиты

из стекловолокна или минеральной ваты, завернутые в стеклоткань, не так просто. Кроме того, для производства минерального волокна для существующих конструкций панелей расходуется большое количество топлива и электроэнергии.

Выводы. Подобранные материалы для новой конструкции шумозащитной панели. Так как перфорированная передняя и глухая задняя стенки экрана делаются из мелкозернистого фибробетона, были спроектированы и исследованы его свойства. В качестве заолнителя использовались обогащенные фракционированные пески, для армирования щелочестойкие базальтовые волокна, с хорошими акустическими свойствами. Большая часть внутреннего объема панели заполнена отсортированным сорняком перекасти-поле, густые ветвистые стебли которого пропитаны перлитобетоном. Источником сорных растений являются местные бурные степи.

Для выявления оптимальной рецептуры мелкозернистого базальтофибробетона, являющегося важным элементом шумоизоляционного экрана, были подобраны составы и изготовлены образцы бетона. Варьируя компонентами формовочных бетонных смесей портландцементом в пределах 535–585 кг/м³ и фракционированным заполнителем 1590–1610 кг/м³, с комплексным использованием базальтовых волокон и суперпластификатора Master Glenium 115 удалось выявить оптимальные рецептуры мелкозернистого бетона. Установлено, что физико-механические характеристики базальтофибробетона сопоставимо с традиционным бетоном возросли примерно на 70–80 %, что позволит в дальнейшем повысить долговечность моделируемых шумоизоляционных панелей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shashurin A.E., Boiko I.S. The Problem of High-Speed Railway Noise Prediction and Reduction // *Procedia Engineering*. Vol. 189. 2017. Pp. 539–546. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.086
2. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом 4-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург: изд-во Логос. 2015. 432 с.
3. Иванов Н.И., Шашурин А.Е., Бойко Ю.С. Влияние материала на акустическую эффективность шумозащитных экранов // *NOISE Theory and Practice*. 2016. С. 24–29.
4. Пат. 172683, Российская Федерация, МПК E01F 8/00(2006.01). Панель резонатор. / А.Е. Шашурин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций" № 2016113103; заявл. 2016.04.05; опубл. 2019.20.12. Бюл. № 35.
5. Шашурин А.Е., Бойко Ю.С., Бужинский К.В. Проектирование и строительство шумозащитных экранов: исключение характерных ошибок, унифицированность и удешевление конструкции // *Биосферная совместимость*. 2017. №3 (19). С. 96–104.
6. Пат. 2646256 Российская Федерация, МПК E04B 1/84 (2006.01) Акустический экран для производственных помещений. / О.С. Кочетов; заявитель и патентообладатель Кочетов Олег Савельевич (RU). № 2017107573; заявл. 2017.07.03.; опубликовано 2018.02.03. Бюл. №7
7. Nahaev M.R., Harchenko I.Ya., Murtazaev S-A.Y. Compositions of OTDV for injection consolidation of soils with a complex filler of various genesis // *Ecology and Industry of Russia*. 2015. № 3. Pp. 48–52.
8. Татаринцева О.С., Углова Т.К., Игонин Г.С. и др. Определение сроков эксплуатации базальтоволоконных теплоизоляционных материалов // *Строительные материалы*. 2004. № 11. С. 14–15.
9. Salamanova M.Sh., Murtazayev S-A. Yu., Alaskanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp. 500–503. URL <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914231>.
10. Буянтуев С.Л., Кондратенко А.С. Исследование физико-химических свойств минеральных волокон, полученных с помощью электромагнитного технологического реактора // *Вестник ВСГУТУ*. 2013. №5 (44). С. 123–129.
11. Шилиев А.И. Определение условий образования каплеобразных и петлеобразных неволоконистых включений в производстве супертонкого базальтового волокна // *Актуальные проблемы науки: сб. науч. тр. Тамбов*. 2011. С. 159–163.
12. Беранек Л., Меллоу Т. Акустика: звуковые поля и преобразователи. Elsevier, Oxford. 1-е издание. 2012. 128с.
13. Линчевский И.А. Семейство плюмбаговые (Plumbaginaceae). Жизнь растений. В 6 т. под ред. А.Л. Тахтаджяна. М.: 1980. Т. 5. Ч. 1. Цветковые растения. 430 с.
14. Жуков А.В., Байвель И.Я., Кашперовская О.П. Материалы и изделия на основе вспученного перлита. М.: Изд. лит. по строительству, 1972. 159 с.
15. Архаров А.М., Беляков В.П., Микулин Е. И. и др. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987. 536 с.
16. Li H., Richards C., Watson J. High-Performance Glass Fiber Development for Composite Applications // *International Journal of Applied Glass Science*. 2014. Vol. 5. Pp. 65–81. doi:10.1111/IJAG.12053

Информация об авторах

Нахаев Магомед Рамзанович, кандидат технических наук, доцент, проректор по науке и инновациям / E-mail: mr-nakhaev@mail.ru. Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова. Россия, 364024, Грозный, ул. Шерипова, 32. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова. Россия, 364051, Грозный, пр. Исаева, 100.

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

Поступила 22.01.2022 г.

© Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш., 2022

^{1,2}Nakhaev M.R., ^{2,3,*}Salamanova M.Sh.

¹Kadyrov chechen state university

²Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov

³Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences

*E-mail: madina_salamanova@mail.ru

MATERIALS AND TECHNOLOGY FOR OBTAINING A RECYCLED NOISE PROTECTION PANEL

Abstract. *There are thousands of kilometers of noise protection screens around the world along roads, railways and near airports. The use of such screens poses some issues. Barriers often lack the required level of sound absorption and have low durability. Screens can be noise-absorbing, noise-reflecting or both. Sound absorbing materials are used to suppress noise at medium and high frequencies. For sound deadening at low frequencies, resonant absorbers are used; they are Helmholtz resonators combined into a single structure. When panels reach the end of their life cycle, they must be recycled. Separating wood, metal, fiberglass or rock wool slabs wrapped in fiberglass is not easy. The production of mineral fiber requires a lot of energy. A selection of materials has been proposed and the properties of fine-grained concretes for the further manufacture of a noise-protective panel have been investigated. The perforated front and blank rear walls are made of fine-grained basalt fiber-reinforced concrete reinforced with alkali-resistant basalt fibers. The results of studies of fine-grained basalt concrete confirmed the effectiveness of the combined use of basalt fibers and superplasticizer Master Glenium 115. The physical and mechanical characteristics of basalt fiber-reinforced concrete are increased by about 70–80% compared to traditional concrete, which will further increase the durability of imitation noise protection panels.*

Key words: *noise protection panel, highway, perlite concrete, fibers, basalt fibers, tumbleweed, recycling, energy transition.*

REFERENCES

1. Shashurin A.E., Boyko I.S. The problem of predicting and reducing the noise of high-speed railways. *Procedia Engineering*. Volume. 189. 2017. Pp. 539–546. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.086
2. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control. [Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom]. 4th ed., revised. and additional St. Petersburg: Logos Publishing House. 2015. 432 p.
3. Ivanov N.I., Shashurin A.E., Boyko Yu.S. The use of material on the acoustic efficiency of noise barriers. [Vliyanie materiala na akusticheskuyu effektivnost' shumozashchitnyh ekranov]. NOISE Theory and Practice. 2016. Pp. 24–29. (rus)
4. Shashurin A.E. Panel resonator. Patent RF, no. 172683, 2019. (rus)
5. Shashurin A.E., Boyko Yu.S., Buzhinsky K V. Design and construction of noise barriers: elimination of characteristic errors, uniformity and cost reduction of the structure [Proektirovanie i stroitel'stvo shumozashchitnyh ekranov: iskluchenie harakternyh oshibok, unificirovannost' i udeshevlenie konstrukcii]. *Biospheric Compatibility*. 2017. No 3 (19). Pp. 96–104. (rus)
6. Kochetov O.S. Acoustic screen for industrial premises. Patent RF, no. 2646256, 2018. (rus)
7. Nakhaev M.R., Harchenko I.Ya., Murtazaev S-A.Y. Compositions of OTDV for injection consolidation of soils with a complex filler of various genesis. *Ecology and Industry of Russia*. 2015. No. 3. Pp. 48–52.
8. Tatarintseva O.S., Uglova T.K., Igonin G.S. et al. Determining the service life of basalt fiber heat-insulating materials [Opredelenie srokov eksploatatsii bazal'to-voloknistykh teploizolyacionnykh materialov]. *Construction Materials*. 2004. No. 11. Pp. 14–15. (rus)
9. Salamanova M.Sh., Murtazayev S-A. Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental*

Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp. 500–503. URL <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914231>.

10. Buyantuev S.L., Kondratenko A.S. Study of the physico-chemical properties of mineral fibers obtained using an electromagnetic technological reactor. [Issledovanie fiziko-himicheskikh svoystv mineral'nykh volokon, poluchennykh s pomoshch'yu elektromagnitnogo tekhnologicheskogo reaktora]. Bulletin of the ESGUTU. 2013. No. 5 (44). Pp. 123–129. (rus)

11. Shilyaev A.I. Determining the conditions for the formation of drop-like and loop-like non-fibrous inclusions in the production of super-thin basalt fiber. [Opredelenie usloviy obrazovaniya kapleobraznykh i petleobraznykh nevoloknistykh vklyuchenij v proizvodstve supertonnogo bazal'tovogo volokna]. Actual problems of science: coll. scientific tr. Tambov. 2011. Pp. 159–163. (rus)

12. Beranek L., Mellow T. Acoustics: sound fields and transducers. [Akustika: zvukovye polya i preobrazovateli]. Elsevier, Oxford. 1st edition. 2012. 128 p. (rus)

13. Linchevsky I.A. Plumbaginaceae family. Plant life. [Semejstvo plyumbagovye (Plumbaginaceae). ZHizn' rastenij]. In 6 volumes, ed. A.L. Takhtajyan. M.: 1980. V. 5. Part 1. Flowering plants. 430 p. (rus)

14. Zhukov A.V., Bayvel I.Ya., Kashperovskaya O.P. Materials and products based on expanded perlite. [Materialy i izdeliya na osnove vspuchennogo perlita]. M.: Ed. lit. on construction, 1972. 159 p. (rus)

15. Arkharov A.M., Belyakov V.P., Mikulin E.I., et al., Cryogenic Systems. [Kriogennye sistemy]. M.: Mashinostroyeniye, 1987. 536 p. (rus)

16. Li H., Richards C., Watson J. High-Performance Glass Fiber Development for Composite Applications. International Journal of Applied Glass Science. 2014. Vol. 5. Pp. 65–81. doi:10.1111/IJAG.12053

Information about the authors

Nakhaev, Magomed R. PhD, Associate professor, vice-rector for science and innovations. E-mail: mr-nakhaev@mail.ru. Chechen State University named after A.A. Kadyrov. Russia, 364024, Grozny, st. Sheripova, 32. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100.

Salamanova, Madina S. PhD, Associate Professor. E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100. Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, 21, Staropromyslovskoe highway, Grozny, 364051, Russia

Received 22.01.2022

Для цитирования:

Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш. Материалы и технология получения рециклируемой шумозащитной панели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-8-16

For citation:

Nakhaev M.R., Salamanova M.Sh. Materials and technology for obtaining a recycled noise protection panel. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-17-24

Сулейманов К.А., Погорелова И.А., *Рябчевский И.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kloud09@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ СТЕН ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

Аннотация. Разработка эффективных ограждающих конструкций является на сегодняшний день одним из наиболее востребованных направлений в строительной отрасли. В условиях обеспечения энергоэффективности и экологической безопасности при возведении гражданских зданий в качестве ограждающих конструкций применяются кладка из газобетонных блоков, обладающих высокими теплозащитными свойствами. Поскольку клеевые и цементно-песчаные растворы в кладке имеют низкую теплопроводность и являются температурными мостами, остро стоит вопрос о заполнении сквозных швов газобетонной кладки. Авторами разработана двухрядная энергоэффективная кладка стен из ячеистобетонных блоков с применением в качестве заполнителя сквозных и перевязочных швов полиуретанового клея. В статье рассмотрено влияние сквозных горизонтальных швов, выполненных из цементно-песчаного раствора, и перевязки блоков на сопротивление теплопередаче кладки из газобетонных блоков, а также представлено исследование приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции с учетом теплопроводных включений, представленной в виде традиционной двухрядной ячеистобетонной кладки через ряд, выполненной на тонкослойном клеевом растворе, а также разработанной авторами кладки, на основании которого сделан вывод об обеспечении энергоэффективности разработанных стеновых ограждений за счет повышенной теплотехнической однородности кладки.

Ключевые слова: ячеистый бетон, кладка, теплотехническая однородность, полиуретановый клей, приведенное сопротивление теплопередаче.

Введение. Снижение материалоемкости и, соответственно, трудоемкости строительства при сохранении эксплуатационных характеристик зданий и сооружений стало основным направлением развития строительства. Для того, чтобы повышение теплозащитных свойств не влекло за собой рост материалоемкости, разрабатываются и внедряются новые строительные материалы, изделия и конструкции, появление которых позволяет совместить основные тенденции совместного строительства: снижение материалоемкости, как основной экономической задачи, и повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций, как основная составляющая общей задачи повышения энергоэффективности зданий [1–3].

Одним из основных эффективных строительных материалов, применяемых при устройстве наружных стен зданий, является ячеистый бетон [4]. Строительные системы из ячеистобетонных блоков обеспечивают требуемую теплоизоляцию при минимальной толщине конструкции. Однако фактором, снижающим энергоэффективность ограждающих конструкций, выполненных в виде кладки из ячеистобетонных блоков, является заполнение швов кладки теплопроводящими материалами.

Учитывая тот факт, что толщина однорядной ячеистобетонной кладки (рис. 1, а) не обеспечивает требуемую теплоизоляцию [5], на практике, зачастую, используется строительная система с облицовочным слоем из кирпича, фиксируемого к блокам гибкими связями (рис. 1, б) [6, 7]. Но при коэффициенте теплотехнической однородности стеновой конструкции, состоящей из газобетонных блоков марки D400 толщиной 375 мм с лицевым слоем из облицовочного кирпича толщиной 120 мм, равном 0,61, условное сопротивление теплопередаче составляет 2,99 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт, что для II и III климатических зон России меньше требуемого значения – 3,08 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт [8]. А устройство теплоизоляционного слоя повышает материалоемкость и трудоемкость монтажа стеновой конструкции за счет обеспечения теплоизоляционному слою ветро- и парозащиты.

Наиболее оптимальным в данном случае способом монтажа ограждающих конструкций является двухрядная кладка стен из ячеистобетонных блоков с поперечной перевязкой блоков, выполненная на тонкослойном клеевом растворе с толщиной шва 1...3 мм (рис. 1, в).

Данная кладка недостаточно энергоэффективна в связи с наличием большого количества сквозных горизонтальных швов, являющимися «мостиками холода» и снижающими ее теплозащитные свойства.

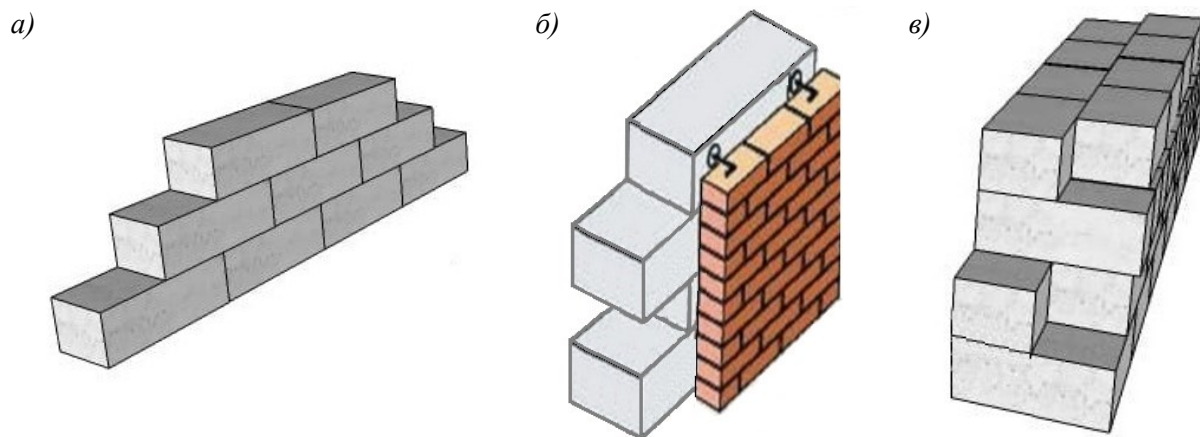


Рис. 1. Ограждающие конструкции из ячеистобетонных блоков:
а – однорядная кладка; *б* – однорядная кладка с лицевым слоем из облицовочного кирпича;
в – двухрядная кладка с поперечной перевязкой блоков

При устройстве кладки из ячеистобетонных блоков применяются три основных наиболее распространенных варианта выполнения швов кладки: на полиуретановом клее, цементно-песчаном растворе и цементном клее [9, 10].

Кладка на цементно-песчаном растворе является более материалоемкой за счет устройства швов толщиной 8...10 мм, при этом данный материал является наименее теплопроводным, что снижает теплозащитные свойства всей ограждающей конструкции.

Использование цементного клея в качестве заполнителя швов кладки является рациональным решением в связи с его высокой теплотехнической однородностью при толщине шва 1...2 мм, обладая при этом низкой деформативностью и высокой прочностью.

В качестве заполнителя вертикальных и горизонтальных швов также применяется однокомпонентный полиуретановый клей. По сравнению с общепринятой технологией кладки на цементных клеевых составах или растворах, кладка на

полиуретановом клее исключает мокрые процессы на строительной площадке, обеспечить требуемые теплотехнические показатели за счет высокой теплотехнической однородности конструкции, снизить материалоемкость и примерно вдвое увеличивает скорость возведения кладки [11–13].

В качестве двухрядной ограждающей конструкции из одноразмерных ячеистобетонных блоков наиболее распространена кладка с поперечной перевязкой блоков через ряд (рис. 2, *а*). Однако данная кладка недостаточно энергоэффективна в связи с наличием большого количества сквозных горизонтальных швов, снижающих теплотехническую однородность ограждающей конструкции.

Авторами разработана энергоэффективная двухрядная газобетонная кладка стен (рис. 2, *б*), особенностью которой является высокая теплотехническая однородность за счет уменьшения количества сквозных горизонтальных швов.

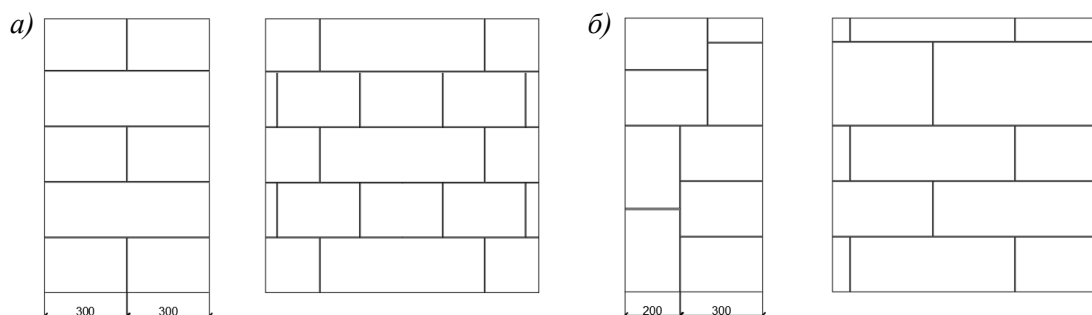


Рис. 2. Поперечный разрез и общий вид кладок из ячеистобетонных блоков:
а – кладка с поперечной перевязкой блоков через ряд; *б* – двухрядная ячеистобетонная кладка

Особенностью, разработанной авторами энергоэффективной двухрядной ячеистобетон-

ной кладки, является перевязка сквозных горизонтальных швов за счет укладки внутреннего или наружного ряда блоков ложком вниз при

устройстве параллельного ряда блоков постелью вниз. В участке выравнивания высот внутреннего и наружного рядов блоков устраивается плашковая перевязка рядов блоков для обеспечения стеновой конструкцией требуемой жесткости.

Данное технологическое решение позволяет уменьшить количество сквозных горизонтальных швов в 3 раза при использовании блоков сечением 200×300 мм и в 4 раза – сечением 150×200 мм, тем самым увеличивая теплотехническую однородность, и снизить материалоемкость и, как следствие, трудоемкость устройства кладки на 20 % за счет меньшей толщины ограждающей конструкции.

Материалы и методы. Исследование теплотехнических свойств газобетонной кладки с учетом теплопроводных включений в виде сквозных швов достаточно важно для эффективного применения кладки, зачастую, в качестве единственного теплоизоляционного слоя стеновой конструкции. Поэтому повышение теплотехнической однородности кладки из газобетонных блоков при обеспечении требуемых эксплуатационных характеристик определяет энергетическую и экономическую эффективность устройства разработанной авторами двухрядной ячеистобетонной кладки.

Анализируя виды кладок и их эксплуатационные характеристики авторами проведены рас-

четные и экспериментальные исследования влияния сквозных швов на теплотехнические показатели.

Для расчетно-экспериментальной оценки теплотехнических показателей стеновой конструкции авторами рассмотрены фрагменты газобетонной кладки, представленные в виде участка сквозного шва и участка перевязки блоков. Путем механической обработки изготовлены модели кладки (рис. 3) размерами $250 \times 250 \times 50$ мм, состоящие из двух рядов фрагментов газобетонных блоков, соединенных между собой цементно-песчаным раствором. Модели *а* и *в* (рис. 3) представлены участками перевязки фрагментов блоков, модели *б* и *г* (рис. 3) представлены в виде одного и двух сквозных швов соответственно. Все швы выполнены толщиной 5 мм.

Рассматриваемые фрагменты представлены тремя видами однородной части конструкции:

- участок кладки в виде сквозного шва (рис. 3, поз. 1);
- участок кладки в виде слоистой конструкции, состоящей из двух вертикальных рядов фрагментов газобетонных блоков, соединяемых между собой слоем цементно-песчаного раствора (рис. 3, поз. 2);
- участок перевязки швов фрагментов кладки (рис. 3, поз. 3).

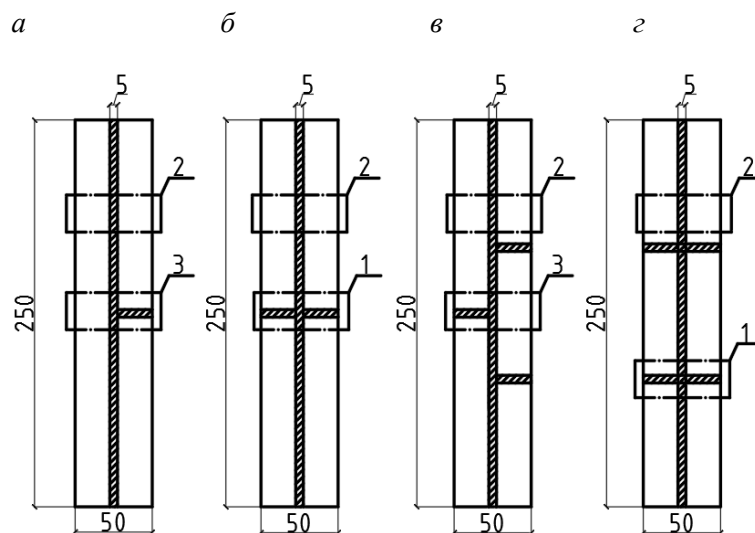


Рис. 3. Поперечные разрезы моделей кладки: *а* – в виде перевязки фрагментов блоков с одним несквозным швом; *б* – в виде одного сквозного шва; *в* – в виде перевязки фрагментов блоков с тремя несквозными швами; *г* – в виде двух сквозных швов; 1 – участок перевязки блоков; 2 – участок слоистой конструкции; 3 – участок в виде сквозного шва

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче рассматриваются фрагмент газобетонной кладки толщиной 600 мм, состоящей из

блоков *D400* размером $200 \times 300 \times 600$ мм с поперечной перевязкой через ряд и выполненной на тонкослойном клеевом растворе с толщиной шва

3 мм, фрагмент разработанной авторами энергоэффективной двухрядной кладки толщиной 500 мм, состоящей из газобетонных блоков размером $200 \times 300 \times 600$ мм и выполненной на тонкослойном клеевом растворе с толщиной шва 3 мм и фрагмент разработанной авторами энергоэффективной двухрядной кладки толщиной 500 мм, состоящей из газобетонных блоков размером $200 \times 300 \times 600$ мм и выполненной на полиуретановом клее с толщиной шва 1 мм, площадью 1 м^2 каждый (рис. 4).

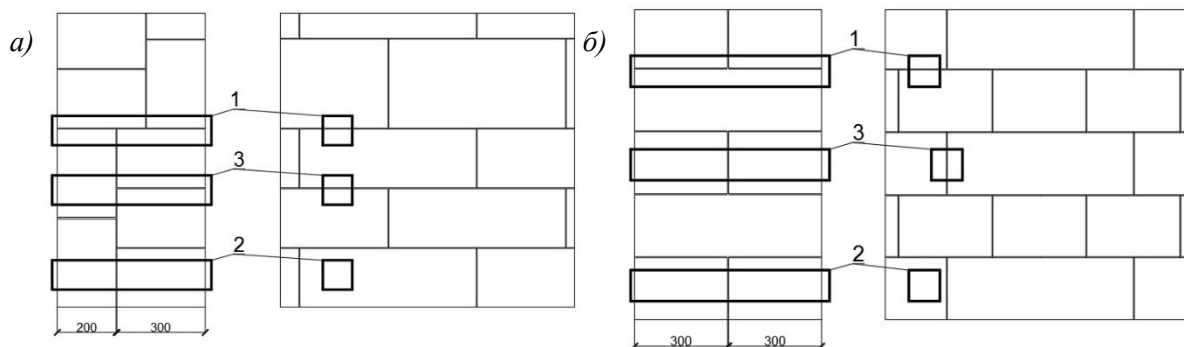


Рис. 4. Поперечный разрез и общий вид фрагментов кладок из газобетонных блоков для определения приведенного сопротивления теплопередаче: *а* – энергоэффективная кладка;

б – газобетонная кладка с поперечной перевязкой через ряд;

1 – участок перевязки горизонтальных рядов кладки; *2* – участок кладки в виде слоистой конструкции;

3 – участок перевязки вертикальных швов кладки

Основная часть. Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции рассчитываемого фрагмента определяется по формуле (1) [14, 15]:

$$R_{ro} = \sum A_i / (\sum A_i / R_{o,i} + \sum L_j \psi_j + \sum N_k K_k) \quad (1)$$

где A_i – площадь конструкции i -го вида в рассматриваемом фрагменте, м^2 ; L_j – протяженность всех стыков j -го вида в рассматриваемом фрагменте, м; N_k – число точечных теплотехнических неоднородностей k -го вида в рассматриваемом фрагменте, шт.; $R_{o,i}$ – сопротивление теплопередаче однородной части конструкции i -го вида, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; ψ_j – дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; K_k – дополнительные удельные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

В качестве теплопроводных включений в расчете принимаются сквозные и перевязочные швы рассматриваемых фрагментов и моделей кладок, выполненных в виде тонкослойного клеевого раствора и полиуретанового клея в связи с разницей их теплофизических характеристик по отношению к ячеистому бетону и малой долей швов на единицу площади поверхности рассматриваемых фрагментов.

Обозначенные фрагменты газобетонных кладок представлены следующими видами однородной части конструкции:

- участок перевязки горизонтальных рядов кладки в виде сквозного горизонтального шва (рис. 4, 1);

- участок кладки в виде слоистой конструкции, состоящей из двух вертикальных рядов ячеистобетонных блоков, соединяемых между собой тонким слоем клеевого раствора (рис. 4, 2);

- участок перевязки вертикальных швов кладки (рис. 4, 2).

Поскольку точечные теплотехнические неоднородности в рассматриваемых фрагментах и моделях отсутствует, $\sum N_k K_k = 0$.

Экспериментальные исследования проводились на измерителе теплопроводности ИТП МГ-4. Разница температур холодильника и нагревателя установки при проведении эксперимента составляла 30°C .

Результаты расчетно-экспериментальной оценки приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов ячеистобетонной кладки в виде сквозных швов и участков их перевязки представлены на рис. 5.

Из данных, представленных на рис. 5, можно сделать вывод о том, что наилучшие теплотехнические показатели у модели кладки *а* в связи с отсутствием у данной модели сквозных швов, являющимися теплопроводными включениями, на $10 \dots 30\%$ по сравнению с моделью кладки *б*, обладающей одним сквозным швом. Следует отметить, что теплотехнические показатели модели кладки *с*, обладающей тремя участками перевязки блоков, сопоставимы с показателями модели кладки *б* с одним сквозным швом. Также по данным исследований, наименее энергоэффективной является модель кладки *д*, теплотехнические характеристики которой уступают модели кладки *с* с несквозными швами на $10 \dots 25\%$.

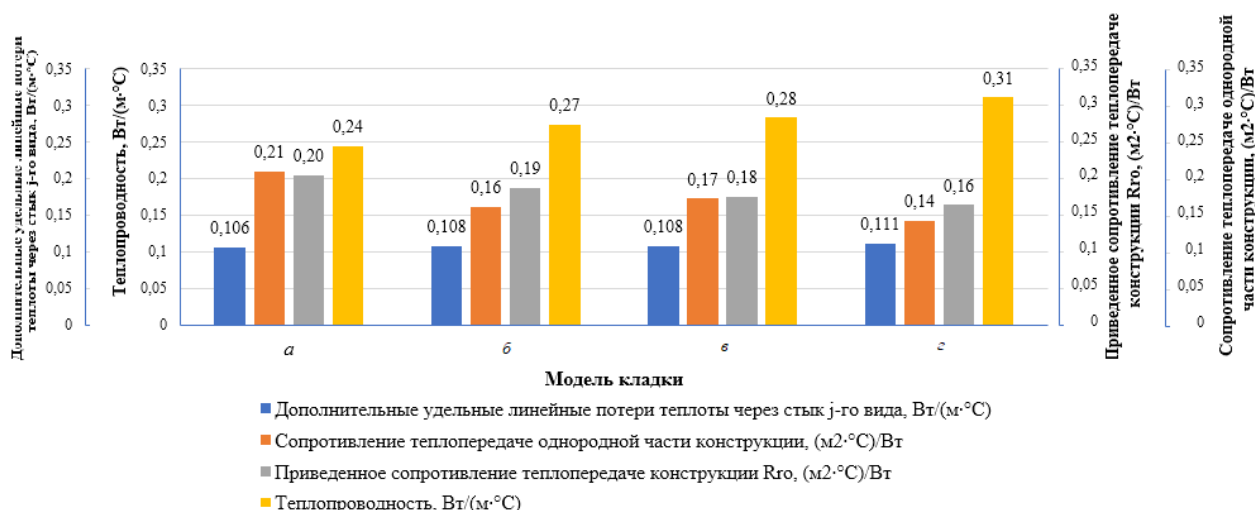


Рис. 5. Средние значения основных теплотехнических показателей моделей кладки: *a* – в виде перевязки фрагментов блоков с одним несквозным швом; *б* – в виде одного сквозного шва; *в* – в виде перевязки фрагментов блоков с тремя несквозными швами; *з* – в виде двух сквозных швов

Результаты расчетно-экспериментальной оценки фрагментов двухрядных ячеистобетонных кладок, включающей определение приведенного сопротивления теплопередаче, линейных

потерь через стык и коэффициента теплопроводности, представлены на рис. 6.

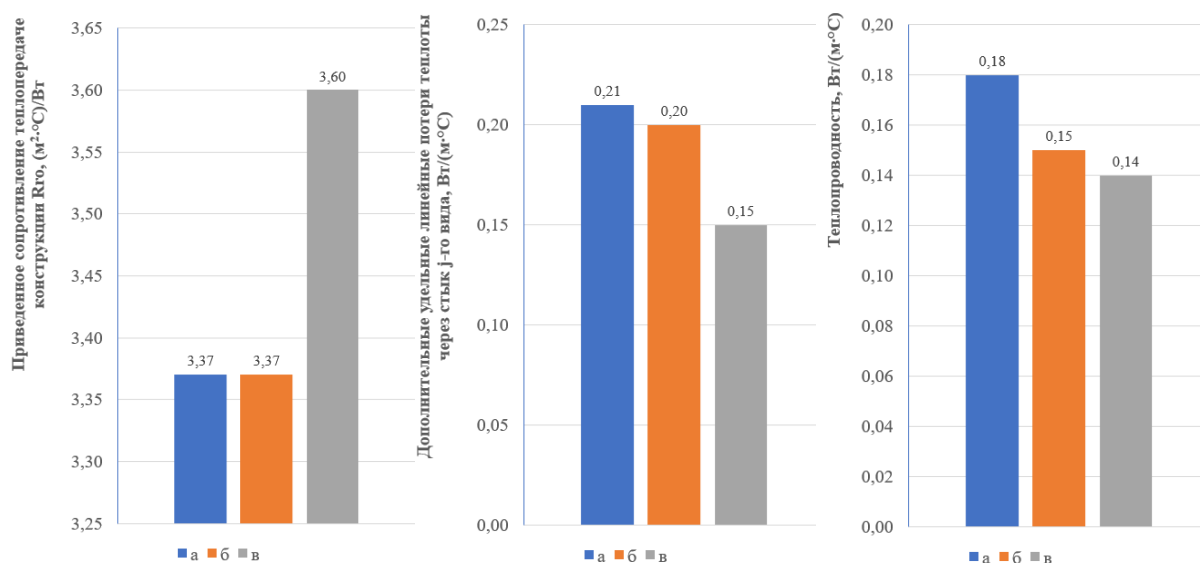


Рис. 6. Средние значения основных теплотехнических показателей исследования двухрядных стеновых конструкций из ячеистобетонных блоков: *a* – газобетонная кладка с поперечной перевязкой через ряд; *б* – энергоэффективная кладка на тонкослойном клеевом растворе; *в* – энергоэффективная кладка на полиуретановом клее

Из данных, представленных на рис. 6, можно сделать вывод о том, что разработанная авторами энергоэффективная двухрядная кладка стен имеет такое же приведенное сопротивление теплопередаче, что и газобетонная кладка с поперечной перевязкой через ряд, имеющая толщину, превышающую рассматриваемую в 1,2 раза. Следует отметить, что теплотехнические показатели модели кладки с, швы которой выполнены из полиуретанового клея, приведенное сопротивление

теплопередаче на 7 % выше аналогичной на тонком клеевом растворе, а дополнительные удельные потери теплоты ниже на 30...40 % в сравнении с рассматриваемыми фрагментами, что говорит о повышенной теплотехнической однородности полиуретанового клея и ячеистобетонного блока.

Выводы. Разработана и запроектирована энергоэффективная двухрядная газобетонная кладка для возведения ограждающих стеновых

конструкций, обладающая минимальным количеством сквозных швов. Для определения влияния сквозных швов на теплотехнические показатели кладки были возведены модели конструкции на участке сквозного шва и на участке перевязки блоков. После проведения расчетных и экспериментальных исследований и обработки результатов установлено, что уменьшение количества сквозных горизонтальных швов повышают энергоэффективность стеновых конструкций на 10...30 %.

Применение разработанной авторами энергоэффективной двухрядной газобетонной кладки позволяет повысить теплозащитные свойства стеновой конструкции за счет уменьшения теплопроводных включений в вид сквозных швов, а также снизить материалоемкость и, следовательно, трудоемкость возведения ограждающей конструкции за счет уменьшения толщины кладки при обеспечении требуемых эксплуатационных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grinfeld G.I. Performance Characteristics of Autoclaved Aerated Concrete with Density 400 kg/cub.m // Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. No. 5(10). Pp. 28–57.
2. Гущин С.В., Семенов А.С., Чхао Шень. Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. № 5. 2020. С. 31–43. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43
3. Карпов Д.Ф. Применение активного и пассивного теплового контроля в дефектоскопии строительных материалов и изделий, ограждающих конструкций зданий и сооружений // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2, № 4. С. 39–44. doi:10.34031/2618-7183-2019-2-4-39-44
4. Stritih U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Buildings // Energy and Buildings. 2003. No. 35(11). Pp. 1097–1104. doi:10.1016/j.enbuild.2003.07.001
5. Harmati N., Jakšić Ž., Vatin N. Energy consumption modelling via heat balance method for energy performance of a building // In: Procedia Engineering. 2015. Pp. 786–794. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.238
6. Vatin N., Gamayunova O. Energy saving at home // In: Applied Mechanics and Materials. Vols. 672–674 2014. Pp 550–553. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.672-674.550
7. Girault M., Petit D. Identification methods in nonlinear heat conduction. Part II: inverse problem using a reduced model // Int. Journal of Heat and Mass. 48(1). 2005. Pp 119–133. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.033
8. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A. Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012006. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012006
9. Siu W.M. Discrete Formulation Using Thermal Resistance for Conduction Heat Transfer Analysis of Sphere Packings. The Hong Kong University of Science and Technology Library. 2001. 144 p. doi:10.14711/thesis-b710751
10. Peng P.F., Qin X.M., Wu Y.S. Performance Study on Masonries of Different Aerated Concrete Blocks // Key Engineering Materials. 2014. 633. Pp. 299–302.
11. Tsilingiris P.T. Parametric Space Distribution Effects of Wall Heat Capacity and Thermal Resistance on the Dynamic Thermal Behavior of Walls and Structures // Energy and Buildings. No. 38(10), 2006. Pp 1200–1211. doi:10.1016/J.ENBUILD.2006.02.007
12. Ahmed A. Sustainable Construction Using Autoclaved Aerated Concrete (Aircrete) Blocks // Research & Development in Material Science. 2017. № 1(4). Pp. 000518. doi:10.31031/RDMS.2017.01.000518
13. Yang F., Sun L.Z., Xie Z. L. Theoretical Study on Optimal Design of Thermal Performance of Aerated Concrete-Based Composite Thermal Insulation Wall // Advanced Materials Research. 2012. 450–451. Pp. 663–666. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.663
14. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ryabchevskiy I.S. Energy-efficient double-row masonry of the exterior walls in the buildings made of cellular concrete blocks // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913. 022044. doi:10.1088/1757-899X/913/2/022044
15. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. Energy efficient stone cellular concrete masonry on polyurethane adhesive // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. 151. Pp. 55–65. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_8

Информация об авторах

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

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

Рябчевский Игорь Сергеевич, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kloud09@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.11.2021 г.

© Сулейманов К.А., Погорелова И.А., Рябчевский И.С., 2022

Suleymanov K.A., Pogorelova I.A., *Ryabchevskiy I.S.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: kloud09@mail.ru

INCREASING THE THERMAL UNIFORMITY OF WALLS MADE OF CELLULAR CONCRETE BLOCKS

Abstract. The development of effective protecting structures is currently one of the most popular areas in the construction industry. Masonry made of aerated concrete blocks is used in conditions of ensuring energy efficiency and environmental safety in the construction of civil buildings as enclosing structures. It has high thermal protection properties. The issue of filling through seams of aerated concrete masonry is acute, since adhesive and cement-sand mortars in masonry have low thermal conductivity and are temperature bridges. The authors have developed a two-row energy-efficient wall masonry made of aerated concrete blocks using polyurethane glue as a filler for through and dressing joints. The article discusses the effect of horizontal through joints made of cement-sand mortar and blocking of blocks on the resistance to heat transfer of masonry from aerated concrete blocks. In addition, it presents a study of the reduced resistance to heat transfer of the enclosing structure, taking into account heat-conducting inclusions, presented in the form of a traditional two-row aerated concrete masonry through a row, made on a thin-layer adhesive solution, as well as the masonry developed by the authors. It is concluded that the energy efficiency of the developed wall fencing is ensured due to the increased thermal homogeneity of the masonry.

Keywords: aerated concrete, masonry, heat engineering uniformity, polyurethane glue, reduced heat transfer resistance.

REFERENCES

1. Grinfeld G.I. Performance Characteristics of Autoclaved Aerated Concrete with Density 400 kg/cub.m. Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. No. 5(10). Pp. 28–57.
2. Gushchin S.V., Semenenko A.S., Shen C. World trends in the development of energy-saving technologies [Mirovye tendencii razvitiya energosberegayushchih tekhnologij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 31–43. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43 (rus)
3. Karpov D.F. Application of active and passive thermal control in the flaw detection of building materials and products, protecting structures of buildings and structures [Primenenie aktivnogo i passivnogo teplovogo kontrolya v defektoskopii stroitel'nyh materialov i izdelij, ograždayushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij]. Construction Materials and Products. 2019. Vol. 2, No. 4. Pp. 39–44. doi:10.34031/2618-7183-2019-2-4-39-44 (rus)
4. Stritih U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Buildings. Energy and Buildings. 2003. 35(11). Pp. 1097–1104. doi:10.1016/j.enbuild.2003.07.001
5. Harmati N., Jakšić Ž., Vatin N. Energy consumption modelling via heat balance method for energy performance of a building. In: Procedia Engineering. 2015. Pp. 786–794. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.238
6. Vatin N., Gamayunova O. Energy saving at home. In: Applied Mechanics and Materials. Vols. 672-674 2014. Pp 550–553. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.672-674.550
7. Girault M., Petit D. Identification methods in nonlinear heat conduction. Part II: inverse problem using a reduced model. Int. Journal of Heat and Mass. 2005. 48(1). Pp 119–133. doi:10.1016/j.ijheat-masstransfer.2004.06.033
8. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A. Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012006. doi:10.1088/1757-899X/945/1/012006
9. Siu W.M. Discrete Formulation Using Thermal Resistance for Conduction Heat Transfer Analysis of Sphere Packings. The Hong Kong University of Science and Technology Library. 2001. 144 p. doi:http://dx.doi.org/10.14711/thesis-b710751
10. Peng P.F., Qin X.M., Wu Y.S. Performance Study on Masonries of Different Aerated Concrete

Blocks. Key Engineering Materials. 2014. 633. Pp. 299–302.

11. Tsilingiris P.T. Parametric Space Distribution Effects of Wall Heat Capacity and Thermal Resistance on the Dynamic Thermal Behavior of Walls and Structures. Energy and Buildings. 2006. 38(10). Pp 1200–1211. doi:10.1016/J.ENBUILD.2006.02.007

12. Ahmed A. Sustainable Construction Using Autoclaved Aerated Concrete (Aircrete) Blocks. Research & Development in Material Science. 2017. No. 1(4). Pp. 000518. doi:10.31031/RDMS.2017.01.000518

13. Yang F., Sun L.Z., Xie Z. L. Theoretical Study on Optimal Design of Thermal Performance of

Aerated Concrete-Based Composite Thermal Insulation Wall. Advanced Materials Research. 2012. 450–451. Pp. 663–666. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.663

14. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ryabchevskiy I.S. Energy-efficient double-row masonry of the exterior walls in the buildings made of cellular concrete blocks. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 913. 022044. doi:10.1088/1757-899X/913/2/022044

15. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. Energy efficient stone cellular concrete masonry on polyurethane adhesive. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. 151. Pp. 55–65. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_8

Information about the authors

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

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

Ryabchevskiy, Igor S. Assistant. E-mail: kloud09@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 23.11.2021

Для цитирования:

Сулейманов К.А., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-17-24

For citation:

Suleymanov K.A., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. Increasing the thermal uniformity of walls made of cellular concrete blocks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-17-24

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-25-32

Гайнетдинов Р.Г., Гимранов Л.Р., Сибгатуллин М.Т.Казанский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru*

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТЕНКИ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ЧАСТЬЮ В БОЛТОВЫХ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Аннотация. В статье рассмотрено новое узловое соединение тонкостенных холодногнутох профилей с трапецевидной частью стенки с применением сквозной втулки с упором. Применение данного конструктивного решения позволяет выполнить постановку дополнительных болтов в зоне вогнутой части стенки тонкостенного профиля, тем самым включить данную область в работу. Отмечается, что изобретение по сравнению с аналогами позволяет упростить процесс сборки узла, за счет фиксации положения втулки при применении уширенной части с одной стороны фасонки. При этом для эффективного противодействия потери местной устойчивости стенки тонкостенного холодногнутого профиля предлагается расположить соседние втулки со сторонами в противоположном направлении.

Изучены вопросы деформативности стенки тонкостенного холодногнутого профиля при постановке дополнительных рядов болтов в трапецевидной части стенки за счет разработанных конструктивных решений: с применением сквозной втулки, сквозной втулки с упором и при отсутствии болтов в зоне трапецевидной части. В работе приведены результаты смещений из плоскости стенки под воздействием сжимающей нагрузки при различных вариациях болтовых узловых соединений. Выполнена сравнительная оценка эффективности узловых соединений с точки зрения сопротивлению потери местной устойчивости. По результатам исследований выявлено, что болтовое узловое соединение с постановкой дополнительных болтов в части трапецевидной стенки, за счет применения сквозной втулки позволяет уменьшить деформативность на 15 % и на 33 % при использовании сквозной втулки с упором по отношению с соединением с двухрядной постановкой болтов.

Ключевые слова: болтовое узловое соединение, тонкостенный холодногнутый профиль, сквозная втулка с упором, местная устойчивость, трапецевидная часть стенки, опытный образец, верхний пояс.

Введение. Научно-технический прогресс ускоряет смену оборудования и технологий, поэтому часто стальной каркас, удовлетворяющий первоначальному технологическому процессу, оказывается через 20-30 лет совершенно непригодным для новых технологий. Из-за этого требуется реконструкция, а иногда и полный снос каркаса. В связи с этим на рынке строительства возникает потребность в легких конструкциях, которые можно быстро смонтировать, разобрать и перепрофилировать под другие технологические процессы. Одним из способов для решения отмеченной проблемы служит использование в конструкциях тонкостенных холодногнутох профилей. Технология легких стальных тонкостенных оцинкованных профилей (ЛСТК) начинает прогрессивно развиваться с начала 21 века. Область применения ЛСТК несущие и ограждающие конструкции объектов промышленного и гражданского назначения [1–2].

Наиболее часто тонкостенные холодногнутые профили в несущих конструкциях применяются в рамах [3–8] и фермах [9–11]. Поперечная рама каркаса состоит из стоек и скатных сплош-

ных или решетчатых ригелей. В основном несущие конструкции из ЛСТК имеют пролет до 18 м, устанавливаются с шагом 3–6 м, элементы выполняются из одиночных или из спаренных профилей, сечения которых С-образные, с трапецевидной частью стенки, соединенные с помощью листовой фасонки на болтах.

Однако авторы в статьях [9, 10] отмечают, что для дальнейшего развития ЛСТК в строительной отрасли, а именно для увеличения пролета, несущей способности необходимо разрабатывать новые эффективные узловое соединения, отвечающие экономическим требованиям, надежности конструкции и удобства монтажа.

В связи с этим авторы в работе [12] провели исследования болтового узлового соединения верхнего пояса фермы пролетом 24 м из тонкостенных холодногнутох профилей. В работе выявлено, что постановка дополнительных рядов болтов в зоне трапецевидной части стенки позволяет получить равномерное распределение напряжений по сечению тонкостенного профиля, тем самым повысить несущую способность со-

единения. Для постановки дополнительных рядов болтов в зоне трапециевидной части стенки разработаны новые узловые соединения:

1. заполнения свободного пространства между фасонкой и трапециевидной частью стенки профиля листовой пластиной [12];

2. конструктивное решение с применением сварной втулки [13, 14];

3. конструктивное решение с применением сквозной втулки [15, 16];

В данной статье предлагается новое узловое соединение тонкостенных холодногнутых профилей с трапециевидной частью стенки с применением сквозной втулки с упором [17]. При этом рассматриваются вопросы деформативности стенки профиля в узле при двухрядной постановке болтов, при постановке дополнительных болтов в зоне трапециевидной части стенки за счет применения сквозной втулки и сквозной втулки с упором.

Цель работы: Сравнительная оценка деформативности трапециевидной части стенки тонкостенного профиля при различных конструктивных решениях узлового соединения.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка нового узлового соединения тонкостенных холодногнутых профилей, которая позволит выполнить постановку болтов в зоне трапециевидной части стенки, и при этом повысить местную устойчивость стенки;

2. Построение конечно-элементную модели болтовых узловых соединений в ПК «Solidworks» с применением сквозной втулки, сквозной втулки с упором и при двухрядной постановке болтов в зоне контакта с листовой фасонкой;

3. Численное исследование напряженно-деформированного состояния болтовых узловых соединений тонкостенных холодногнутых профилей с трапециевидной частью стенки;

4. Анализ деформативности стенки различных вариантов конструктивных решений болтовых узлов при действии расчетной нагрузке;

Болтовое узловое соединение тонкостенных холодногнутых профилей с трапециевидной частью стенки с применением сквозных втулок с упором. Одной из главных задач создания нового болтового узла состоит в фиксации положения сквозной втулки при установке стяжного болта, и при этом повысить устойчивость стенки тонкостенного холодногнутого профиля в процессе эксплуатации конструкции. Новый узел представляет собой тонкостенные холодногнутые профили с трапециевидной частью стенки 1, соединенные листовой фасонкой 2 на болтах 3. В зоне трапециевидной части стенки профиля установлены усиливающие элементы 4, которые выполнены в виде сквозной втулки, пропущенные через отверстие в листовой фасонке 3. Сквозная втулка с одной стороны изготавливается большего диаметра $D1$, чем отверстие в листовой фасонке, а остальная часть втулки выполняется по диаметру этого отверстия d . При этом соседние втулки располагаются со сторонами в противоположном направлении (рис. 1).

Предлагаемое узловое соединение позволяет выполнить постановку болтов в зоне трапециевидной части стенки профиля, при этом зафиксировать положение втулки при постановке стяжного болта и предполагает уменьшение деформации стенки профиля за счет уширенной части втулки при эксплуатации конструкции.

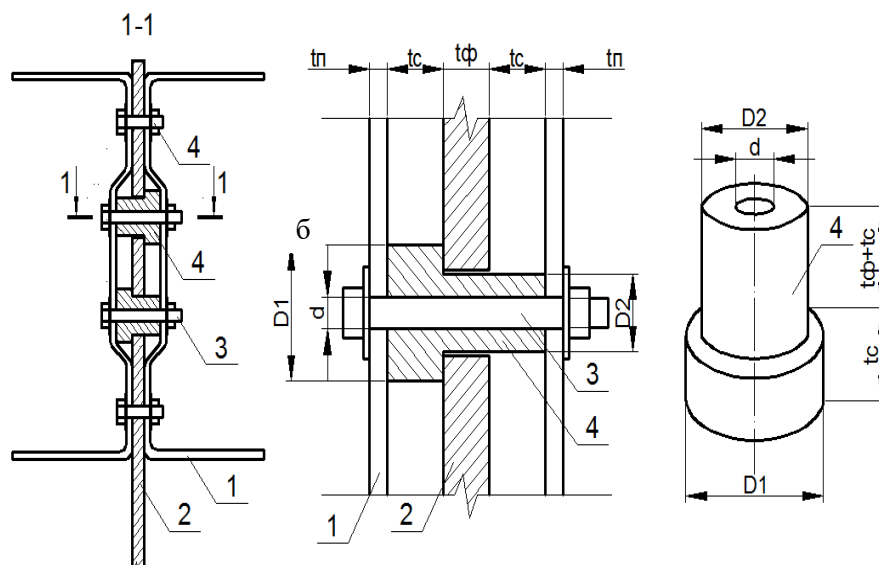


Рис. 1. Болтовое узловое соединение тонкостенных холодногнутых профилей с трапециевидной частью стенки с применением сквозных втулок с упором:

1 – тонкостенные холодногнутые профили с трапециевидной частью стенки;
2 – листовая фасонка; 3 – болт; 4 – сквозная втулка с упором

Новое узловое соединения может найти применение в области строительства, в частности, в рамах, в решетчатых конструкциях, например, фермы, изготавливаемые из парных стальных тонкостенных холодногнутых профилей с трапециевидной частью стенки, соединенные в узлах при помощи листовых фасонки на болтах [3–5, 7, 9, 10–11].

Материалы и методы. Одним из опасных факторов разрушения болтовых узловых соединений из тонкостенных холодногнутых профилей и приводящие к полной непригодности конструкции является потеря местной устойчивости. При этом для повышения местной устойчивости тонкостенных профилей в сжатых и в сжато-изгибаемых элементах выполняются различные элементы жесткости (канавки, углубления). В частности, в рассматриваемом узле тонкостенные холодногнутые профили выполнены с трапециевидной частью стенки.

Влияние на фактическое напряженное состояние тонкостенного профиля при установке дополнительных рядов в зоне трапециевидной части стенки рассмотрены в работах [12, 13, 15]. При этом вопросы деформативности стенки (смещения из плоскости) при подкреплении их различными вариантами втулок и их сравнение с традиционным узловым соединением с двухрядной постановкой болтов ранее не проводились. Для проведения данного исследования выбраны три варианта болтовых узловых соединения с трапециевидной частью стенки (табл. 1):

1. Узловое соединение составных тонкостенных холодногнутого профилей с трапециевидной частью стенки при двухрядной постановке болтов в зоне контакта с листовой фасонкой;

2. Узловое соединение составных тонкостенных холодногнутого профилей с трапециевидной частью стенки при многорядной постановке болтов за счет применения сквозной втулки. Для постановки болтов используется сквозная втулка, которая вставляется в отверстие листовой фасонки. Сквозная втулка ликвидирует зазор между трапециевидной частью стенки профиля и фасонкой. При этом длина сквозной втулки:

$$H = t_{\phi} + 2t_c,$$

где t_{ϕ} – толщина фасонки; t_c – свободная толщина плоской вогнутой стенки профиля;

3. Узловое соединение составных тонкостенных холодногнутого профилей с трапециевидной частью стенки при многорядной постановке болтов за счет применения сквозной втулки с упором.

Для оценки смещения стенки из плоскости тонкостенного холодногнутого профиля в болто-

вом узле при различных вариантах конструктивных решений построены конечно-элементные модели опытных образцов в ПК «Solidworks» (табл. 1). Узлы состоят из двух профилей АСГ-400-100-30-4.0 по ТУ 1122-023-129063390-2009 высотой 400 мм из стали класса С350. Между профилями установлена листовая фасонка толщиной 16 мм из стали класса С245. Крепление профилей с листовой фасонкой выполнено болтами М16 класса прочности 5.8 двумя рядами. В каждом ряду расположено семь болтов с шагом 50 мм. Фасонка соединена по низу опорной пластины 400×100×16 мм [12].

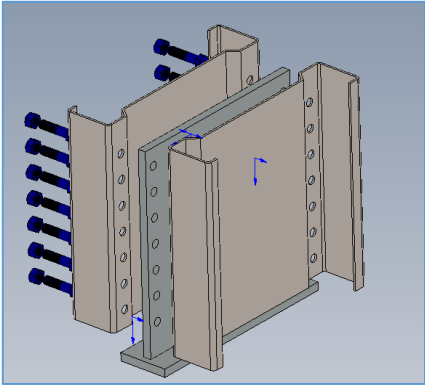
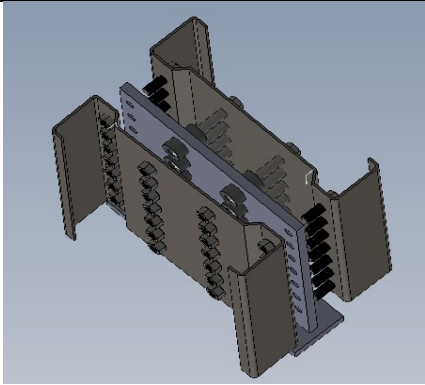
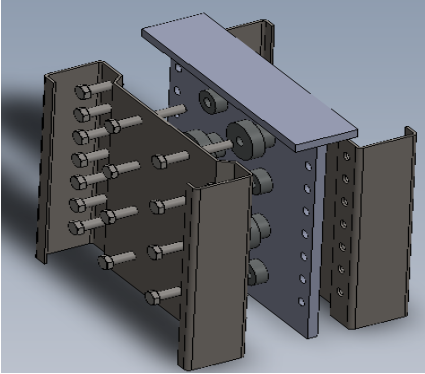
Разбиение геометрической модели на конечные элементы выполнялась с учетом геометрии элементов сборки, наличия отверстий и расстояний между ними. Сетка конечно-элементной модели объемная второго порядка, с размерами 20×20 мм. Расчет модели узла выполнялось в программном модуле «Solidworks Simulation» с учетом геометрической и физической нелинейности. Граничные условия болтовых узлов «fixed support», как неподвижная геометрия опорной пластины. Контакты между соединяемыми элементами задавались, как «frictional» с коэффициентом трения $\mu=0,15$.

Обсуждение результатов исследований. Нагрузка на образцы приложена расчетная $N=63,2$ т, найденная по результатам исследований [12]. При этом приложение ее производилось ступенчато по 10 т, в конце каждого этапа производилось измерение перемещения стенки тонкостенного профиля из плоскости. Напряженно-деформированное состояние образцов представлено на (рис. 2). Фиксация перемещения стенки тонкостенного холодногнутого профиля выполнялось в одной точке в зоне расположения средних болтов в трапециевидной части (рис. 3).

Анализируя графики зависимости перемещения стенки от расчетной нагрузки, можно сказать, что наиболее подвержен к потере местной устойчивости узловое соединение при двухрядной постановке болтов в зоне контакта с листовой фасонкой, где отклонение из плоскости составили – $\delta=13,32$ мм при нагрузке $N=63,2$ т. Выявлено, что при подкреплении стенки тонкостенного профиля сквозной втулкой и установке дополнительных болтов в трапециевидной части стенки деформации снижаются ($\delta=10,53$ мм при $N=63,2$ т) на 21%. Эффективным решением, с точки зрения потери местной устойчивости стенки является решение с применением сквозной втулки с упором, где перемещения меньше из всех ($\delta=8,91$ мм при $N=63,2$ т). На 33 % меньше, чем при двухрядной постановке болтов и на 15 % при постановке болтов с применением сквозной втулки.

Таблица 1

**Болтовые узловые соединения составных тонкостенных холодногнутых профилей
с трапецевидной частью стенки**

1. Болтовой узел соединения с двухрядной постановкой болтов в зоне контакта листовой фасонки и профиля	
2. Болтовой узел соединения с многорядной постановкой болтов с применением сквозной втулки	
3. Болтовой узел соединения с многорядной постановкой болтов с применением сквозной втулки с упором	

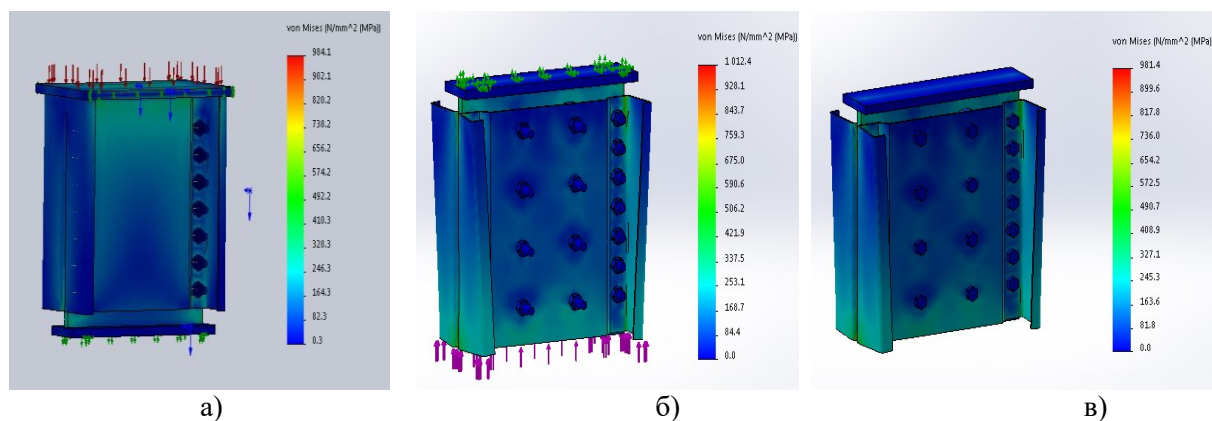


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние опытных образцов: а) при двухрядной постановке болтов; б) при многорядной постановке болтов с применением сквозной втулки; в) при многорядной постановке болтов с применением сквозной втулки с упором

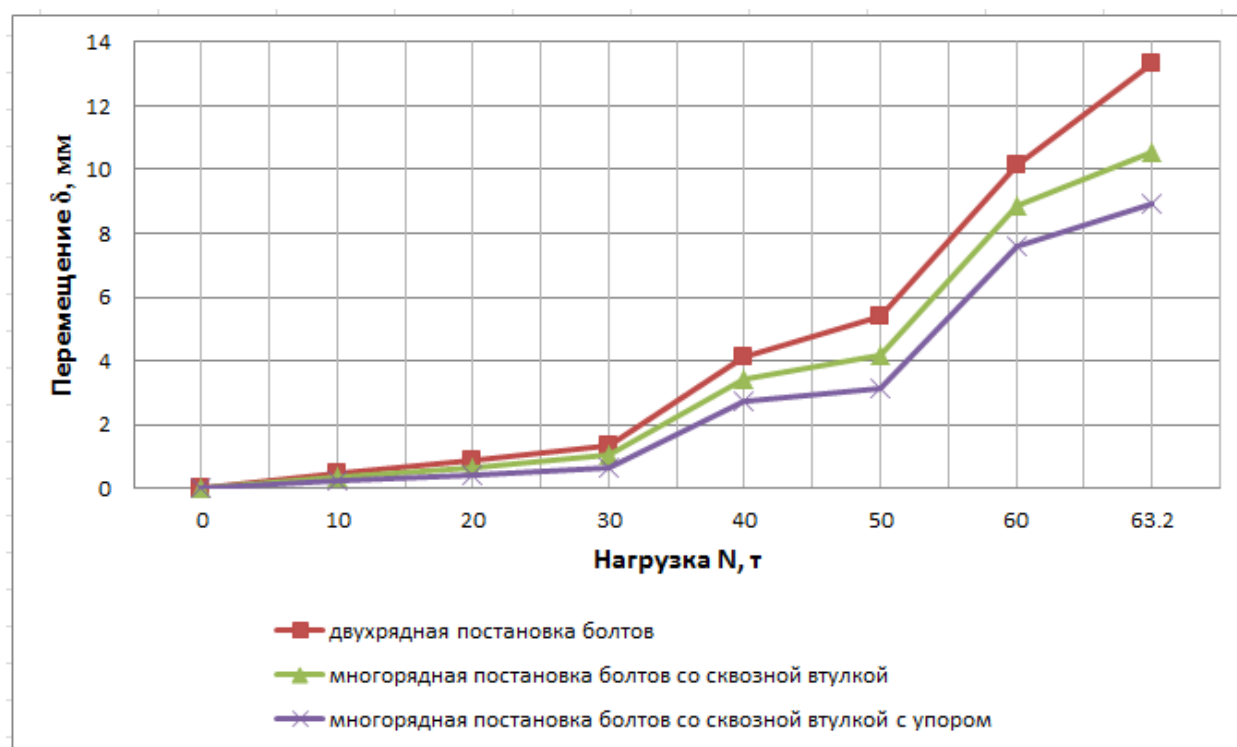


Рис. 3. Зависимость перемещения δ стенки тонкостенного холодногнутого профиля от нагрузки N при разных вариантах узловых соединений

Выводы

1. Представлено новое узловое соединение тонкостенных холодногнутого профилей с применением сквозных втулок с упором, позволяющее выполнить постановку болтов в трапецевидной части стенки профиля, при этом упростить процесс сборки соединения за счет фиксации положения втулки.

2. Установлено, что постановка дополнительных рядов болтов в трапецевидной части стенки тонкостенного холодногнутого профиля позволяет уменьшить деформативность стенки на 21 % при использовании сквозной втулки и на 33 % – сквозной втулки с упором по сравнению с решением с двухрядной постановкой болтов в зоне контакта листовой фасонки и профиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Енджиевский Л.В., Крылов И.И., Кретьнин А.Н., Терешкова А.В. Ограждающие и несущие строительные конструкции из стальных тонкостенных профилей // Издательство Инфра – М, 2017. 282 с.
2. Жидков К.Е., Семенов А.С. Совершенствование конструктивных решений ферм из тонкостенных холодногнутого профилей // XIII Международная научная конференция «Прикладные и Фундаментальные исследования» (9–10 декабря, 2017, Сент-Луис, Миссури, США). С. 79–83.
3. Зверев В.В., Жидков К.Е., Семенов А.С., Сотникова И.В. Экспериментальные исследования рамных конструкций из холодногнутого профилей повышенной жесткости // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительства и архитектура. 2011. № 4. С. 20–24.
4. Енджиевский Л.В., Тарасов А.В. Исследования рамы каркаса здания несущими элементами бикоробчатого сечения из тонколистовой оцинкованной стали // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №. 10. С. 52–54.
5. Тарасов А.В. Экспериментально-теоретические исследования рамных конструкций из стальных тонкостенных холодногнутого профилей. автореф. дис.канд. техн. наук. Томск, 2013. 23 с.
6. Вержбовский Г.Б., Горохова Д.С. Рамные конструкции из легких стальных тонкостенных профилей // Актуальные процессы формирования науки в новых условиях: сборник статей Международной научно-практической конференции г. Москва. 10 марта 2016. С. 23–25.
7. Любавская И.В. Напряженно-деформированное состояние рамной конструкции из стальных гнутых профилей. автореф. дис.канд. техн. наук. Липецк, 2018. 23 с.
8. Устименко Е.Е. Рамно-стержневые конструкции с элементами из тонкостенных стальных профилей. автореф. дис.канд. техн. наук. Ростов-на-Дону. 2021. 24 с.

9. Зверев В.В., Семенов А.С. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных гнутых профилей // Строительство и архитектура. Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 2 (10). С. 9–7.

10. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Стенд и результаты испытания фермы пролетом 24 м со стержнями из оцинкованных холодногнутых профилей // Известия КГАСУ. 2018. № 4. С. 193–199.

11. Семенов А.С. Ферма из холодногнутых профилей повышенной жесткости с болтовыми соединениями. автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж. 2009. 22 с.

12. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник МГСУ. 2019. №. 7. С. 831–843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843.

13. Kuznetsov I., Gainetdinov R. New nodal connection of thin-walled cold formed profiles with a trapezoidal wall using separate welded bushings //

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890(1). Pp. 1–7. doi:10.1088/1757-899X/890/1/012041

14. Пат. 2728076, Российская Федерация, МПК E04C 3/08. Решетчатая конструкция / И.Л. Кузнецов, Р.Г. Гайнетдинов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ КазГАСУ. № 2019131942; заявл. 09.10.2019; опубл. 28.07.2020, Бюл № 22. 4 с.

15. Кузнецов И. Л., Гайнетдинов Р. Г. Новое узловое соединение холодногнутых профилей с трапециевидной стенкой // Приволжский научный журнал. Строительные конструкции, здания и сооружения. г. Нижний Новгород. 2021. № 1. С. 24–33.

16. Пат. 2730153, Российская Федерация, МПК E04C 3/08. Узел соединения стержней в решетчатой конструкции / И.Л. Кузнецов, Р.Г. Гайнетдинов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ КазГАСУ. № 2020109265; заявл. 02.03.2020; опубл. 19.08.2020, Бюл № 23. 4 с.

17. Пат. 2748018, Российская Федерация, МПК E04C 3/08; E04B 1/58; Узел соединения стержней в решетчатой конструкции / Р.Г. Гайнетдинов, И.Л. Кузнецов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ КазГАСУ. № 202013554; заявл. 28.10.2020; опубл. 18.05.2021, Бюл № 14. 4 с.

Информация об авторах

Гайнетдинов Ришат Габдулхаевич, аспирант кафедры металлических конструкций и испытания сооружений. E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Гимранов Линур Рафаилович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических конструкций и испытания сооружений. E-mail: leenur@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Сибгатуллин Марат Тафкилович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлических конструкций и испытания сооружений. E-mail: maratts@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Поступила 15.01.2022 г.

© Гайнетдинов Р.Г., Гимранов Л.Р., Сибгатуллин М.Т., 2022

***Gainetdinov R.G., Gimranov L.R., Sibgatullin M.T.**

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

**E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru*

ON THE QUESTION OF ESTIMATION OF THE WALL DEFORMABILITY OF THIN-WALL COLD FORMED PROFILES WITH A TRAPEZOID PART IN BOLT NODAL JOINTS

Abstract. The article discusses a new nodal connection of thin-walled and cold-formed profiles with a trapezoidal part of the wall using a through stop bushing. The use of this constructive solution allows to place additional bolts in the area of the concave part of the wall of a thin-walled profile, thereby including this area in work. It is noted that the invention in comparison with analogs allows to simplify the assembly process of the node by fixing the position of the sleeve when using a broadened part on one side of the gusset. At the same time, in order to effectively resist the loss of local stability of the wall of a thin-walled and cold-formed profile, it is proposed to arrange adjacent bushings with sides in the opposite direction. Issues of deformability of the wall of a thin-walled and cold-formed profile are studied when additional rows of bolts are installed in the

trapezoidal part of the wall due to the developed design solutions: using a through bushing, a through bushing with a stop and in the absence of bolts in the area of the trapezoidal part. The paper presents the results of displacements of the wall under the influence of a compressive load with different variations of bolted nodal joints. A comparative assessment of the efficiency of nodal connections from the point of view of resistance to loss of local stability has been carried out. In result, it is revealed that a bolted nodal connection with the installation of additional bolts in a part of a trapezoidal wall, due to the use of a through bushing, can reduce deformability by 15% and by 33% when using a through bushing with an emphasis in relation to a connection with a two-row bolting.

Keywords: bolted joint, thin-walled cold-formed profile, through bush with stop, local stability, trapezoidal part of the wall, prototype, top flange.

REFERENCES

1. Endzhiyevskiy L.V., Krylov I.I., Kretinin A.N. Tereshkova A.V. Fencing and load-bearing building structures made of steel thin-walled profiles [Ograzhdayushchiye i nesushchiye stroitelnyye konstruksii iz stalnykh tonkostennykh profiley]. Izdatelstvo Infra. M. 2017. 282 p.
2. Zhidkov K.E., Semenov A.S. Improvement of constructive solutions of trusses made of thin-walled cold-formed profiles [Sovershenstvovaniye konstruktivnykh resheniy ferm iz tonkostennykh kholodnogutykh profiley]. XIII International Scientific Conference "Applied and Basic Research" (December 9-10, 2017, St. Louis, Missouri, USA). Pp. 79–83.
3. Zverev V.V., Zhidkov K.Y., Semenov A.S., Sotnikova, I.V. Experimental researches of frame constructions from cold-formed profiles of raised rigidity [Eksperimentalnyye issledovaniya ramnykh konstruktsey iz kholodnogutykh profiley povyshennoy zhestkosti]. Construction and architecture. Scientific Bulletin of Voronezh state University of architecture and construction. 2011. No. 2. Pp. 20–24. (rus)
4. Endzhiyevskiy L.V., Tarasov A.V. Numerical and experimental research frames frame building of sheet galvanized steel [Chislennyye i eksperimentalnyye issledovaniya ramy karkasa zdaniya iz tonkolistovoy otsinkovannoy stali]. Industrial and civil engineering. 2012. No. 10. Pp. 52–54. (rus)
5. Tarasov A.V. Experimental and theoretical studies of frame structures from steel thin-walled cold-formed profiles [Eksperimentalno-teoreticheskiye issledovaniya ramnykh konstruktsey iz stalnykh tonkostennykh kholodnogutykh profiley]. Dissertation of the candidate of technical sciences. Tomsk. 2013. 23 p. (rus)
6. Verzhbovskiy G.B., Gorokhova D.S. Frame structures made of light steel thin-walled profiles [Ramnyye konstruksii iz legkikh stalnykh tonkostennykh profiley]. Actual processes of the formation of science in the new conditions. Collection of articles of the International scientific-practical conference. 2016. Pp. 23–25. (rus)
7. Lyubavskaya I.V. Stress-strain state of a frame structure made of bent steel sections [Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye ramnoy konstruksii iz stalnykh gutykh profiley]. Dissertation of the candidate of technical sciences. Lipetsk. 2018. 23 p. (rus)
8. Ustimenko E.E. Frame-bar structures with elements of thin-walled steel profiles [Ramno-sterzhnevyye konstruksii s elementami iz tonkostennykh stalnykh profiley]. Dissertation of the candidate of technical sciences. Rostov-na-Donu. 2021. 24 p. (rus)
9. Zverev V.V., Semenov A.S. Influence of bolted connections compliance on deformability of girder made from slender roll-formed sections [Vliyaniye podatlivosti boltovykh soyedineniy na deformativnost fermy iz tonkostennykh gutykh profiley]. Construction and architecture. Scientific Bulletin of Voronezh state University of architecture and construction. 2008. No. 2 (10). Pp. 9–17. (rus)
10. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Gainetdinov R.G. Stand and test results of a 24 m span truss with elements of galvanized cold-formed profiles [Stend i rezultaty ispytaniya fermy proletom 24 m so sterzhnyami iz otsinkovannykh kholodnogutykh profiley]. News of the KSUAE. 2018. No. 4. Pp. 193–200. (rus)
11. Semenov A.S. Truss made of cold-formed sections of increased rigidity with bolted connections [Ferma iz kholodnogutykh profiley povyshennoy zhestkosti s boltovymi soyedineniyami]. Dissertation of the candidate of technical sciences. Voronezh. 2009. 22 p. (rus)
12. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov, M.A., Gainetdinov, R.G. Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles [Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boltovogo uzla soyedineniya iz kholodnogutykh tonkostennykh profiley]. Vestnik of MGSU. 2019. No. 7. Pp. 831–843. doi:10.22227/1997-0935.2019.7.831-843. (rus)
13. Kuznetsov I., Gainetdinov R. New nodal connection of thin-walled cold formed profiles with a trapezoidal wall using separate welded bushings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890(1). Pp. 1–7. doi:10.1088/1757-899X/890/1/012041
14. Kuznetsov I.L., Gainetdinov R.G. Lattice work. Patent RF, no. 2728076, 2020.

15. Kuznetsov I.L., Gainetdinov R.G. New nodal connection of cold-formed trapezoidal wall profiles [Novoye uzlovoye soyedineniye kholodnognutnykh profiley s trapetsiyevidnoy stenkoy]. The Privolzhsky scientific journal. 2021. No. 1. Pp. 24–33. (rus)

16. Kuznetsov I.L., Gainetdinov R.G. The node for connecting bars in a lattice structure. Patent RF, no. 2730153, 2020.

17. Kuznetsov I.L., Gainetdinov R.G. The node for connecting bars in a lattice structure Patent RF, no. 2748018, 2021.

Information about the authors

Gainetdinov, Rishat G. Postgraduate student. E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Gimranov, Linur R. PhD. E-mail: leenur@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya 1.

Sibgatullin, Marat T. PhD. E-mail: maratts@mail.ru Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya.

Received 15.01.2022

Для цитирования:

Гайнетдинов Р.Г., Гимранов Л.Р., Сибгатуллин М.Т. К вопросу оценки деформативности стенки тонкостенных холодногнутох профилей с трапециевидной частью в болтовых узловых соединениях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 25–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-25-32

For citation:

Gainetdinov R.G., Gimranov L.R., Sibgatullin M.T. On the question of estimation of the wall deformability of thin-wall cold formed profiles with a trapezoid part in bolt nodal joints. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 25–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-25-32

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40

*Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э.

Воронежский государственный технологический университет

*E-mail: cccp38@yandex.ru

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ В ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Аннотация. Статья посвящена моделированию ветровых потоков при размещении новых строительных объектов в сложившейся застройке. В работе использовались технологии CFD (вычислительной гидрогазодинамики, *computation fluid dynamics*) для оценки влияния ветра, определения направления векторов скорости воздушных потоков при заданном расположении и геометрических характеристиках зданий, рельефа земной поверхности. При решении задач моделирования ветровых потоков на территории жилой застройки был проведен обзор инструментов для архитектурно-климатического анализа, описаны возможности расчета каждого из них, выделены достоинства и недостатки. Сделан вывод, что большая часть инструментов остается проприетарной и не интегрированной в основные программы для архитектурного и градостроительного проектирования. Описываются основные этапы моделирования и получения исходных данных для CFD-анализа: цифровые модели рельефа местности и застройки, полученные на основании геоинформационной модели города, годовые данные о фактическом направлении и скорости ветра в районе исследования. Получены значения скоростей, ветра для рассматриваемой жилой группы, траектории его движения в застройке, спроецированные на вертикальные и горизонтальные плоскости. Результаты моделирования позволяют рассматривать мероприятия по планированию и благоустройству городского пространства и снижению негативного воздействия ветра на застраиваемой территории.

Ключевые слова: микроклимат жилой застройки, ветровой режим, CFD -моделирование.

Введение. Создание благоприятного ветрового режима при проектировании городской застройки является одной из основных задач климатического анализа местности. При этом при реконструкции застройки и строительстве новых зданий не всегда проводятся расчеты по оценке влияния ветра на окружающую территорию. Годовой анализ ветра обычно не используется при проектировании застройки, так как требует значительного времени предварительной обработки исходных данных. Микроклиматические условия городских районов неразрывно связаны с характером и формой застройки, озеленением и ландшафтом территории [1–6]. Воздействие зданий, как трехмерных элементов, на изменение скорости и направления ветра, особенно в составе застройки отдельных планировочных зон, должно учитываться в расчетах аэрации городов. Подобный расчет должен иметь прикладной характер и получение практических результатов необходимо упростить с использованием специальных программ для гидродинамики [7–11]. Важно учитывать аэрационный режим, как естественное проветривание застройки с целью предупреждения ее загазованности, так и возможное неблагоприятное воздействие воздушных потоков с точки зрения создаваемого микроклимата в дворовых пространствах и ветрового давления на здания.

Учет ветрового режима в архитектурно – климатическом анализе необходим при решении следующих задач [12–15]:

- воздействие ветрового давления на здания и сооружения;
- оценка зон застоя воздуха при учете инженерно-транспортной инфраструктуры, сопровождающейся загрязнением воздушного бассейна (зоны со скоростью воздушного потока до 3 м/с и штиль);
- защита жилой застройки от сильного проветривания (более 5 м/с) при расчете комфортного пребывания человека;
- размещения элементов дворовых пространств, озеленения, площадок, парковок.

Исследование процесса обтекания ветровым потоком различных форм рельефа и градостроительных объектов позволяет получить оценку ветрового воздействия на определенных территориях и на ее основе разработать ряд рекомендаций по улучшению аэрационного режима застройки [16].

Целью исследований является анализ ветровых потоков жилой застройки, выполненный различными инструментами для климатического анализа территории. В связи с этим был выбран строящийся объект в г. Воронеж, позволяющий оценить аэрационный режим застройки и сравнить результаты моделирования с реальной ситуацией. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: проанализировать доступность и возможность свободного использования плагин и программ для CFD моделирования; смоделировать ветровой режим застройки и срав-

нить полученный результат с натурными замерами в определенных точках; оценить необходимость использования цифрового моделирования при размещении жилых групп, благоустройстве и реконструкции застройки.

Материалы и методы. Для оценки влияния ветра на планируемую застройку авторами были проанализированы плагины и программы, позволяющие использовать CFD моделирование (computation fluid dynamics). Платформы с открытым исходным кодом, такие как Grasshopper и

Dynamo и их различные плагины появились как интерфейс, позволяющий выполнять инженерные расчеты и визуальное программирование архитекторами, работающими в программах Rhino и Revit соответственно. Эти новые инструменты сделали эксперименты и дизайн современными, а метеорологические параметры более доступными. Наиболее часто используемыми программными продуктами являются Ladybug, ENVI-met, SimScale и Eddy3D, чьи выходные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ программных продуктов по расчету микроклимата

Программное обеспечение	Возможности расчета	Выходные данные
Ladybug v1.4.0 (www.ladybug.tools)	Визуализация данных о погоде и солнечной энергии, моделирование солнечного излучения, движение воздуха внутри помещения	Часы и время инсоляции, солнечное излучение
ENVI-met (www.envi-met.com)	Моделирование наружного микроклимата, количественная оценка теплового комфорта	Температура воздуха, скорость ветра, влажность, средняя радиационная температура
SimScale (www.simscale.com)	CFD моделирование ветрового потока, моделирование ветрового комфорта	Скорость ветра, господствующий ветер, критерии комфорта
Eddy3D (www.eddy3d.com)	CFD-моделирование ветрового потока	Скорость ветра, универсальный термальный климатический индекс (UTCI) давление ветра на фасадах зданий, средняя радиационная температура
ANSYS CFD (Fluent)	CFD-моделирование ветровых нагрузок	Поле давления, аэродинамические коэффициенты, данные о профиле скорости в характерных сечениях

Ladybug – это плагин для анализа окружающей среды с открытым исходным кодом для Grasshopper интерфейса Rhino не совсем стабильно работает для наружных пространств.

ENVI-met – это целостное программное обеспечение для моделирования микроклимата, способное имитировать ветровое обтекание зданий, теплопередачу строительных поверхностей, эвапотранспирацию и отражение, передачу, поглощение и пропускание солнечного излучения вообще. Поток ветра моделируется с помощью уравнения Навье-Стокса (RANS). Препятствием для более широкого внедрения программы в рабочие процессы проектирования являются такие ограничения, как стоимость, знания в области программирования, необходимость огромных вычислительных мощностей и длительное время моделирования.

SimScale – это облачная платформа CFD, способная отображать годовой ход ветра и процессы обтекания зданий ветром. Может загружать геометрические параметры объектов из программ САПР, но результаты не могут импортироваться обратно, поэтому это программное обеспечение также остается ограниченным. Среди преимуществ SimScale – быстрое время вычисле-

ний для годовых симуляций, позволяющее идентифицировать несколько критических состояний в течение года.

Eddy3D – это плагин для имитации воздушного потока и микроклимата для Grasshopper. Он использует OpenFOAM и файлы погоды EPW для прогнозирования годового хода ветра. Результаты легко настраиваются в Grasshopper и Rhino, обеспечивающих точный контроль над визуализацией. Eddy3D является примером доступного и простого в использовании инструмента проектирования CFD в Rhino/Grasshopper, в настоящее время он поддерживает только анализ ветра на открытом воздухе. Плагин Eddy3d для Grasshopper позволяет выполнять как простой просчет ветровых потоков, так и годовой расчет движения ветра с множественным направлением движения и получить коэффициент давления на фасады здания.

ANSYS CFD (Fluent) – программа для расчета ветровых нагрузок. Требуется проведения большой подготовительной работы для создания геометрической модели местности в CAD формате (рельеф, архитектура), граничных условий для моделирования на стенках и пристеночной зоны. Подходит для расчета аэродинамики уже готовой концепции застройки, созданной во

внешних программах. Для каждого нового расчетного случая требуется перестраивать расчетную область и начинать перестраивать сетку сначала, что усложняет процесс моделирования. Для задания сложных граничных условий требуется навык программирования на языке Python. Препятствием для более широкого внедрения программы в рабочие процессы проектирования являются также высокая стоимость.

Основная часть. Для анализа изменения ветровых потоков в жилой застройке рассмотрим

этапы моделирования ветрового режима на примере построенного жилого комплекса в городе Воронеж. Особенностью исследования является наблюдение ветрового режима в годовом периоде при различных изменениях этажности и конфигурации здания. Комплекс представляет собой 19 и 25 этажные здания, примыкающие к улицам Красноармейская и Станкевича и окруженные малоэтажной и средней этажности застройкой (рис. 1).

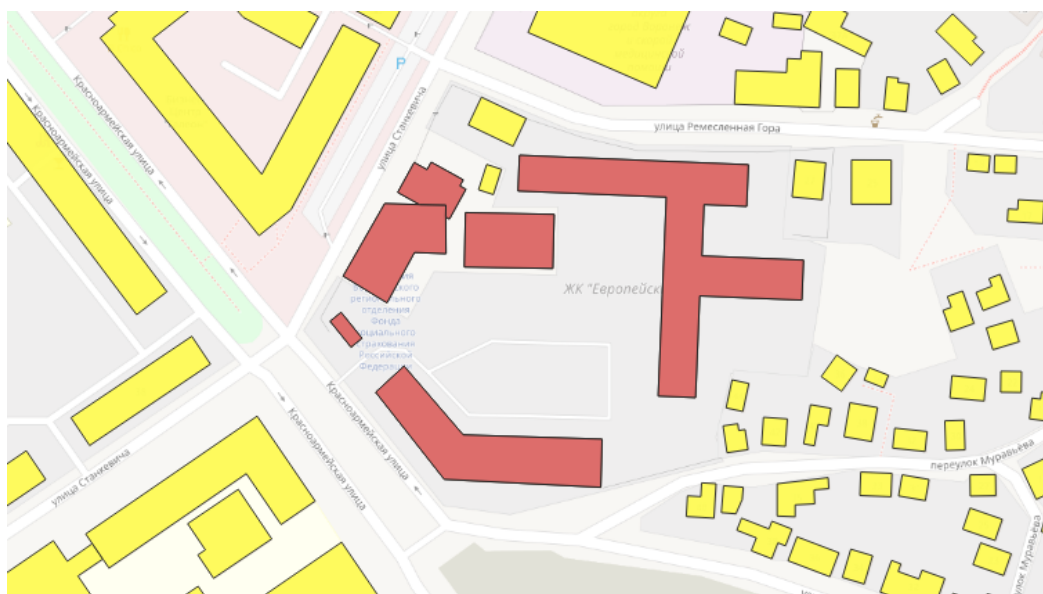


Рис. 1. Жилая застройка для моделирования ветровых потоков на пересечении ул. Станкевича и Красноармейской

Район исследования располагается в правобережной части города на склоне протяженностью около 35 м, спускающемся к водохранилищу. С восточной части участка размещен частный сектор со зданиями 1–2 этажа. Основы расчета ветровых потоков выполнены при помощи плагина Eddy3d для Grasshopper и движка CFD Blue Core (рис. 2). Плагин позволяет задавать исходные данные по рельефу, застройке и климатическим параметрам и делать предварительные просчеты, далее с помощью CFD Blue Core выполняются более сложные расчеты параметров ветра на ограниченном участке.

Наиболее важным этапом CFD-моделирования является геометрически корректное отображение реальной местности, так как ветер подвержен наиболее сильному воздействию со стороны рельефа, озеленения и изменения высоты застройки. Информация о рельефе выгружалась из общедоступных цифровых моделей территорий на основе снимков SRTM (Shuttle radar topographic mission) с помощью плагина Heron. Сведения о геометрических параметрах будущей застройки получены из открытых карт с портала

Open Street Map с присвоением высотных характеристик с помощью программы Qgis. Ветровой режим оценивался на основе данных по годовой повторяемости направлений ветра. В расчетах также была использована информация о скорости и направлении ветра в районе исследования с сайта windy.com.

Моделирование ветровых потоков для жилой застройки включало пять шагов построения. Первым этапом моделирования ветра в Grasshopper является привязка геометрии и границ территории, загрузка рельефа и установка необходимых значений фонового ветрового потока. Расчет позволяет автоматически загружать данные о погоде – в формате *.erw (для имитационной модели, а также данные о скорости и направлении ветра).

Следующий шаг касается установки области расчета в виде обычного бокса. Для моделирования окружающей среды CFD в качестве области моделирования считается лучшей практикой использовать форму бокса. Однако данная форма имеет недостатки, когда речь идет о моделировании воздушного потока с несколькими направлениями ветра: может потребоваться повторная

сетка и дополнительные этапы предварительной обработки, что может потребовать значительных временных ограничений. Моделирование в Grasshopper позволяет также создавать цилиндрическую вычислительную сетку, упрощающую моделирование произвольных направлений ветра. Для предварительных расчетов и сокращения времени вычисления в работе применена сетка в форме бокса.

Следующий этап моделирования – настройка локации расчета и выполнение симуляции построения векторов скорости ветра в заданных плоскостях. Расчеты проводятся в вертикальных и горизонтальных плоскостях. Данный этап включает множественные вычисления и повторение итераций с учетом розы ветров. Полученные данные отправляются в CFD Blue Core для наглядного отображения результатов расчета в объеме и возможности корректировки вычислений.

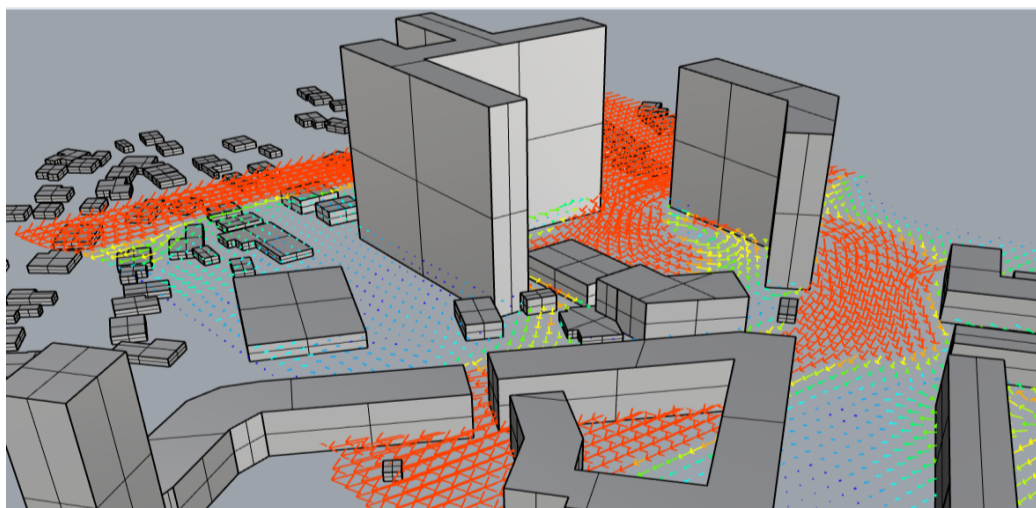


Рис. 2. CFD-модель ветровых потоков в жилой застройке, полученная с помощью плагина Eddy3D

После ряда симуляций при различных исходных фоновых направлениях и скоростях воздушного потока были получены значения векторов скорости ветра вокруг возводимых зданий. Моделирование включало симуляцию вариантов по румбам направления движения ветра. Скорость принималась от минимальной (1–3 м/с), характерной для теплого периода года до максимальной, равной 21 м/с, характерной для холодного периода. Несмотря на то, что в целом для города Воронеж господствующим направлением ветра является западное, моделирование показало, что для данной застройки наихудшими вариантами являются направления южное, юго-восточное и северо-западное.

Для наглядного отображения результатов расчета, данные, полученные с помощью Eddy3D, были интегрированы в CFD Blue Core (рис. 3). Данный переход позволяет получить точки со значениями скоростей ветра в м/с и определить наиболее ветреные места и места застойных зон. Результат аэрационного режима для рассматриваемой жилой группы представлен при ветре южного направления со скоростью 6–9 м/с и сопоставим со значениями, полученными в натурных условиях, что позволяет использовать плагин для моделирования строящихся объектов. Для сравнения результатов цифровой модели с

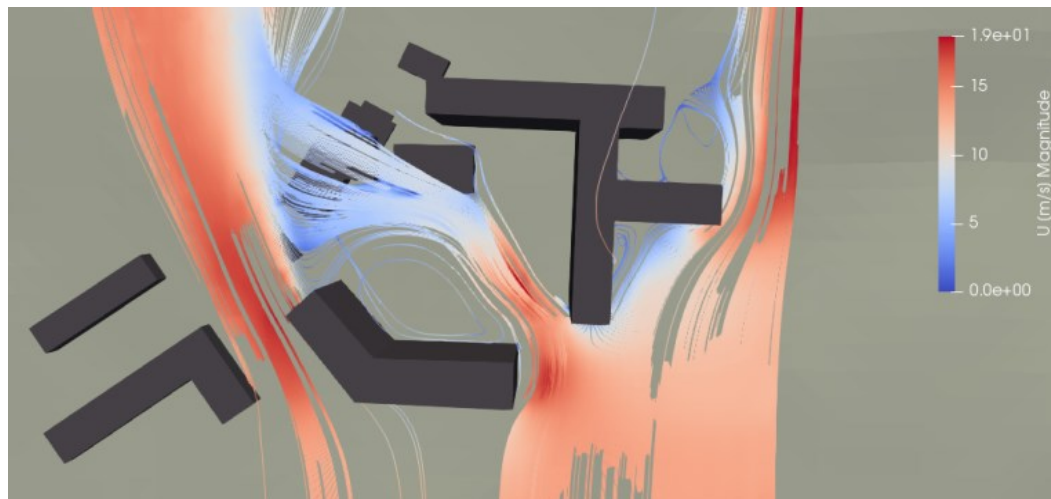
фактическими значениями были произведены замеры скорости движения воздуха анемометром и определено его направление в характерных точках расчетной области дворового пространства на уровне дыхания человека (на высоте 1,5 м) в холодный период года. Полученное поле скоростей было наложено на схему моделирования при тех же условиях для сравнения. Расхождение в среднем не превышает 10 %, лишь в некоторых точках составило до 1–2 м/с. Отклонения теоретических и экспериментальных значений связаны с неучтенными в модели элементами благоустройства и ограждениями.

Наглядное отображение траектории ветровых потоков позволяет разместить с наибольшим комфортом места отдыха жителей и парковки автомобилей без вредного влияния на экологическое состояние территории. При этом необходимо учесть появление замкнутого вихревого потока, циркулирующего в угловых пространствах двора данного жилого комплекса. Данное обстоятельство в летний период года потребует дополнительных мер по созданию благоприятного микроклимата (навесы, озеленение и другие мероприятия). В целях защиты территории от сильных ветров рекомендуется использовать вертикальные объекты благоустройства, элементы озеленения, а также использовать данный фактор

для снижения загазованности улиц и размещения парковок автомобилей.

Как показывают исследования, влияние рельефа, геометрических параметров застройки на поведение воздушного потока в уличном пространстве является существенным. Свободные приемы планировки, расположение под углом к

линии застройки, увеличение отступа от проезжей части, чередование этажности и изменение конфигурации в плане влияет на изменение скорости и направления ветра. Все это указывает на необходимость применения цифрового моделирования при размещении и реконструкции объектов городской среды.



б)

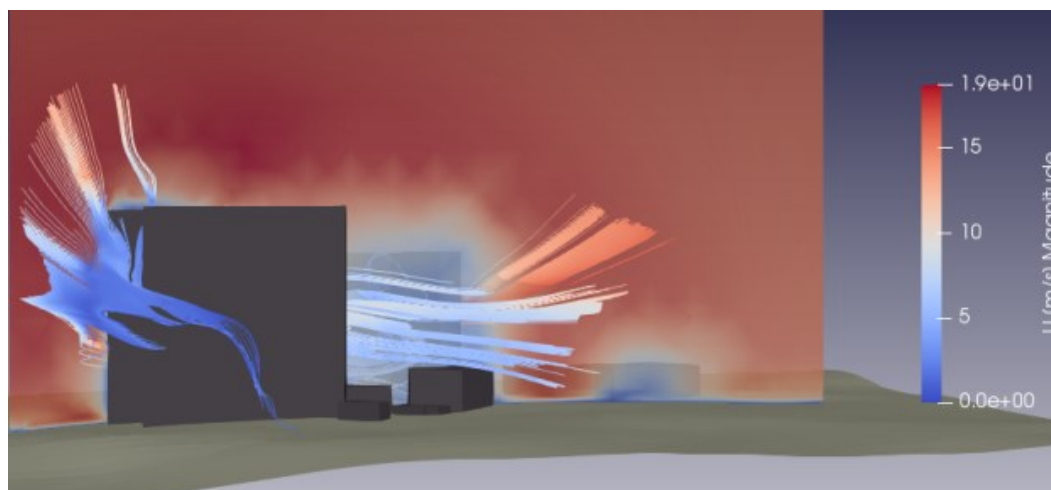


Рис. 3. Отображение ветровых потоков с градацией по скорости от 0 до 19 м/с
(а) в горизонтальной, (б) вертикальной плоскостях

Планирование нового строительства и реконструкция существующих объектов должно осуществляться с анализом годового хода ветра и окружающего ландшафта, создающих особые условия на отдельных участках. Предварительные результаты моделирования в процессе архитектурного проектирования могут улучшить тепловой комфорт в стоящихся объектах, ветровой режим на открытых дворовых пространствах, улицах и патио. Подобный расчет должен иметь прикладной характер, а получение практических результатов необходимо упрощать с использованием специальных программ для гидродинамики.

Выводы

1. Выявлено наличие достаточно большого количества плагинов, разработанных для целей CFD-моделирования, позволяющих проводить архитектурно-климатический анализ. Обзор инструментов для анализа микроклимата показал, что большая часть программного обеспечения остается проприетарным и не интегрированным в основные программы для проектирования. Из рассмотренных авторами в статье существующих программных разработок плагин Eddy3D выделен как доступный и простой в использовании инструмент.

2. В результате компьютерного моделирования застройки были получены траектория и скорость движения воздушных потоков, участки

сильных ветров и застойные зоны. Особенностью исследования является наблюдение ветрового режима в годовом периоде при различных изменениях этажности и конфигурации здания. Результаты цифровой модели ветровых потоков сопоставимы со значениями, полученными в результате натурных измерений, что позволяет рекомендовать рассмотренный программный комплекс для моделирования строящихся объектов для обоснования мероприятий по планированию и благоустройству городского пространства, снижению негативного воздействия ветра на застраиваемой территории.

3. Обоснована необходимость использования цифрового моделирования при размещении жилых групп, благоустройстве и реконструкции застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исанова А.В., Попова И.В. Обеспечение требуемых характеристик внутреннего микроклимата при проектировании квартальной многоэтажной жилой застройки с учётом её аэрационного режима // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 1 (35). С. 25–29.
2. Попова И.В., Любимова Е.В., Куролап С.А. Вычисление параметров шероховатости и оценка аэрационного потенциала городских территорий // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 1 (4). С. 79–87.
3. Харченко С.В. Опыт количественной оценки влияния рельефа на аэрацию городской застройки // Геоморфология. 2016. № 3. С. 45–51. doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-45-51
4. Максимова О.И. Саенко Н.А. Оценка влияния жилой застройки на аэрационный режим центрального района г. Братска // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 5. С. 41–43.
5. Шукуров И.С., Оленьков В.Д., Пайкан В., Аманов Р.М. Обеспечение экологической безопасности городов с учетом аэрационного режима воздуха // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 41–44. doi: 10.12737/article_590878faafb818.60730967
6. Воробьева Ю.А. Мизилина Е.Г. Экологический аспект реконструкции исторически сложившейся застройки по улице Сакко и Ванцетти городского округа г. Воронеж // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2017. № 1. С. 80–83.
7. Бухаров, Д.Н. Применение моделирования аэрации городской застройки в целях экологической безопасности // В сборнике: Безопасность городской среды. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Омск, 2021. С. 103–107.
8. Kastner P.A., Dogan T. Cylindrical meshing methodology for annual urban computational fluid dynamics simulations. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. 13(1). Pp. 59–68. doi:10.1080/19401493.2019.1692906
9. Kastner P., Dogan T. Predicting space usage by multi-objective assessment of outdoor thermal comfort around a university campus. *Proceedings of SimAUD 2020*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346039200>
10. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Т. 21. № 1. С. 5–12. doi: 10.14529/build210101
11. Оленьков В.Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологий компьютерного моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17. № 4. С. 21–27. doi: 10.14529/build170403
12. Силина Ю.А., Тишина Е.В., Коростелева Н.В. Важность учета микроклиматических параметров при благоустройстве дворовых пространств многоквартирных домов // В сборнике: Актуальные вопросы естествознания. материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 262–268.
13. Дуничкин И.В., Хамад М.М.Х. Взаимосвязь аэрационного режима и привлекательности внешнего благоустройства жилой застройки в жарком сухом климате // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 5 (83). С. 34–36.
14. Балакин В.В., Сидоренко В.Ф. Трансформация воздушного потока при обтекании жилых зданий на городских улицах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 44-2 (63). С. 4–18.
15. Грибач Ю.С., Модестов К.А., Лескова Л.В. Расчетные исследования ветрового воздействия при выполнении анализа аэрационного режима территории жилой застройки // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 8 (1008). С. 50–51.
16. Оленьков В.Д., Пронина А.А. Оценка аэрационного режима города при решении проблем градостроительной безопасности // Градостроительство. 2014. № 6 (34). С. 37–41.

Информация об авторах

Воробьева Юлия Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: cccp38@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

Михайлова Татьяна Витальевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: mtvit.1955@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

Бурак Екатерина Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: burak.e@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

Поступила 23.01.2022 г.

© Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э., 2022

***Vorob'eva Yu.A., Mikhailova T.V., Burak E.E.**
Voronezh State Technological University Russia,
*E-mail: cccp38@yandex.ru

DIGITAL SIMULATION OF WIND FLOWS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Abstract. The article is devoted to the modeling of wind flows when placing new construction objects in the existing building. The CFD technologies are used (computational fluid dynamics) to assess the influence of wind, to determine the direction of airflow velocity vectors for a given location and geometric characteristics of buildings, the earth's surface topography. When solving the problems of modeling wind flows in a residential area, a review of tools for architectural and climatic analysis is carried out. In addition, the possibilities of calculating each of them are described, and advantages and disadvantages are highlighted. It is concluded that most of the tools remain proprietary and not integrated into the main programs for architectural and urban design. The main stages of modeling and obtaining initial data for CFD analysis are described: digital models of the terrain and buildings obtained on the basis of a geoinformation model of the city, annual data on the actual direction and speed of the wind in the study area. The values of speeds, wind for the residential group under consideration, the trajectories of its movement in the building, projected onto vertical and horizontal planes are obtained. The simulation results allow to consider measures for planning and beautification of urban space and reducing the negative impact of wind on the built-up area.

Keywords: residential building microclimate, wind regime, CFD modeling.

REFERENCES

1. Isanova A.V., Popova I.V. Ensuring the required characteristics of the internal microclimate when designing a quarterly multi-storey residential building, taking into account its aeration regime [Obespecheniye trebuyemykh kharakteristik vnutrennego mikroklimata pri proyektirovanii kvartal'noy mnogoetazhnoy zhiloy zastroyki s uchotom yeyo aeratsionnogo rezhima]. 2021. No. 1 (35). Pp. 25–29. (rus)
2. Popova I.V., Lyubimova E.V., Kurolap S.A. Calculation of roughness parameters and assessment of the aeration potential of urban areas [Vychisleniye parametrov sherokhovatosti i otsenka aeratsionnogo potentsiala gorodskikh territoriy]. Housing and communal infrastructure. 2018. No. 1 (4). Pp. 79–87. (rus)
3. Kharchenko S.V. Experience in quantitative assessment of the influence of the relief on the aeration of urban development [Opyt kolichestvennoy otsenki vliyaniya rel'yefa na aeratsiyu gorodskoy zastroyki]. Geomorphology. 2016. No. 3. Pp. 45–51. doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-45-51 (rus)
4. Maksimova O.I., Saenko N.A. Assessment of the impact of residential development on the aeration regime of the central district of the city of Bratsk [Otsenka vliyaniya zhiloy zastroyki na aeratsionnyy rezhim tsentral'nogo rayona g. Bratska]. Modern science-intensive technologies. 2005. No. 5. Pp. 41–43. (rus)
5. Shukurov I.S., Olenkov V.D., Paykan V., Amanov R.M. Ensuring the environmental safety of cities, taking into account the aeration regime of air [Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti gorodov s uchotom aeratsionnogo rezhima vozdukh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 41–44. doi:10.12737/article_590878faafb818.60730967 (rus)
6. Vorob'eva Yu.A., Mizilina E.G. Ecological aspect of the reconstruction of historical buildings along Sacco and Vanzetti Street in the city district of Voronezh [Ekologicheskiy aspekt rekonstruktsii istoricheskikh slozhivsheysya zastroyki po ulitse Sakko i Vantsetti gorodskogo okruga g. Voronezh]. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: High technologies. Ecology. 2017. No. 1. Pp. 80–83. (rus)

7. Bukharov D.N. Application of urban aeration modeling for environmental safety [Primeneniye modelirovaniya aeratsii gorodskoy zastroyki v tselyakh ekologicheskoy bezopasnosti] In the collection: Safety of the urban environment. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. Omsk, 2021. Pp. 103–107. (rus)

8. Kastner P.A., Dogan T. Cylindrical meshing methodology for annual urban computational fluid dynamics simulations. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. 13(1). Pp. 59–68. doi:10.1080/19401493.2019.1692906 (rus)

9. Kastner P., Dogan T. Predicting space usage by multi-objective assessment of outdoor thermal comfort around a university campus. *Proceedings of SimAUD* 2020. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346039200>

10. Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Sapogova A.E. Computer modeling of the aeration regime of residential buildings for the purpose of ventilation and wind protection [Komp'yuternoye modelirovaniye aeratsionnogo rezhima zhiloy zastroyki s tsel'yu provetrivaniya i vetrozashchity]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2021. Vol. 21. No. 1. Pp. 5–12. doi:10.14529/build210101 (rus)

11. Olenkov V.D. Accounting for the wind regime of urban development in urban planning using computer modeling technologies [Uchet vetrovogo rezhima gorodskoy zastroyki pri gradostroitel'nom planirovanii s ispol'zovaniyem tekhnologiy komp'yuternogo modelirovaniya]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2017. Vol. 17. No. 4. Pp. 21–27. doi:10.14529/build170403 (rus)

12. Silina Yu.A., Tishina E.V., Korosteleva N.V. The importance of taking into account microclimatic parameters in the improvement of the yard

spaces of apartment buildings [Vazhnost' ucheta mikroklimaticheskikh parametrov pri blagoustroystve dvorovykh prostranstv mnogokvartirnykh domov]. In the collection: Topical issues of natural science. materials of the IV All-Russian scientific-practical conference with international participation. 2019. Pp. 262–268. (rus)

13. Dunichkin I.V., Khamad M.M.Kh. Interrelation of the aeration regime and the attractiveness of the external improvement of residential buildings in a hot dry climate [Vzaimosvyaz' aeratsionnogo rezhima i privlekatel'nosti vneshnego blagoustroystva zhiloy zastroyki v zharkom sukhom klimate]. *Science and business: ways of development*. 2018. No. 5 (83). Pp. 34–36. (rus)

14. Balakin V.V., Sidorenko V.F. Transformation of the air flow when flowing around residential buildings on city streets [Transformatsiya vozdušnogo potoka pri obtekanii zhilykh zdaniy na gorodskikh ulitsakh]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2016. No. 44–2 (63). Pp. 4–18. (rus)

15. Gribach Yu.S., Modestov K.A., Leskova L.V. Computational studies of wind exposure when performing an analysis of the aeration regime of a residential area [Raschetnyye issledovaniya vetrovogo vozdeystviya pri vypolnenii analiza aeratsionnogo rezhima territorii zhiloy zastroyki]. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2018. No. 8 (1008). Pp. 50–51. (rus)

16. Olenkov V.D., Pronina A.A. Evaluation of the aeration regime of the city in solving the problems of urban safety [Otsenka aeratsionnogo rezhima goroda pri reshenii problem gradostroitel'noy bezopasnosti]. *Urban planning*. 2014. No. 6 (34). Pp. 37–41. (rus)

Information about the authors

Vorob'eva Yuliya A. PhD. E-mail cccp38@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Mikhailova Tatyana V. PhD. E-mail mtvit.1955@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Burak Ekaterina E. PhD. E-mail burak.e@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Received 23.01.2022

Для цитирования:

Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40

For citation:

Vorob'eva Yu.A., Mikhailova T.V., Burak E.E. Digital simulation of wind flows in residential buildings. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 5. Pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-41-49

Логина Ю.А.

Департамент культурного наследия города Москвы

E-mail: loginova_rest@mail.ru

ИСТОРИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕМОНТНО-РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ АРХИТЕКТУРНОГО КОМПЛЕКСА ДОНСКОГО МУЖСКОГО МОНАСТЫРЯ В 2013–2021 ГГ.

Аннотация. Статья посвящена проведению комплексной научной реставрации памятников архитектуры и исторического некрополя, расположенных на территории одной из самых известных обителей страны – Донского ставропигиального мужского монастыря. Затронута проблема сохранения каменной скульптуры (из мрамора, известняка, песчаника, гранита) в условиях агрессивной кислотно-щелочной среды и экспонирования ее на открытом воздухе. Изложены основные реставрационные принципы и методы, примененные к конкретным памятникам, а также перечислены виды работ, последовательно предпринимаемые реставраторами для спасения объектов архитектуры на примере Старого (Малого) собора, церкви Михаила Архангела (Усыпальницы Голицыных), башен, монастырской бани XVIII в, а также произведений монументального искусства – художественных надгробий старого Донского кладбища. Особо отмечается, что многие надгробия, выполненные выдающимися мастерами, подарили Донскому некрополю славу Музея под открытым небом. Подчеркивается особая ценность его коллекции, по ней можно изучать архитектурные стили, познавать Российскую историю, изучать комплексы памятников культового, гражданского, фортификационного зодчества, объектов монументального искусства и археологического наследия, а также исследовать новейшие виды и методы реставрационных работ. Реставраторы ведут многолетнюю кропотливую работу по восстановлению всего ансамбля. Представленная в статье информация может быть полезной для реставраторов-практиков и историков-краеведов.

Ключевые слова: культурное наследие, памятник, реставрация, монастырь, некрополь, восстановление.

Введение. Историческое значение Донского монастыря и опыт реставрационных работ монастырского ансамбля.

Донской монастырь расположен в Южном административном округе города Москвы и является объектом культурного наследия федерального значения – «Ансамбль Донского монастыря, XVI–XIX вв.» (Донская пл., вл. 1-3). В 1960 г. обитель принята под государственную охрану как объект культурного наследия федерального значения (Постановление Совета Министров РСФСР № 1327 от 30 августа 1960 г., Указ Президента РФ № 176 от 20 февраля 1995 г.).

Донской монастырь был основан по указу царя Федора Иоанновича в 1592 году в память о событиях 1591 года, когда Москва отразила набег крымских татар под водительством хана Казы-Гирея, объясняя эту победу заступничеством чудотворной иконы Донской Богоматери. «С именем Донской иконы соединены многие победы русских войск. Напутствуя воинские походы молениями пред Донской иконой Божией Матери, русские цари увековечили память чудотворной помощи от нее устроением Донского монастыря.» [1]

Первый каменный собор монастырского комплекса построен мастерами Бориса Годунова

в 1593–1596 гг. на месте походной церкви, в которой находилась чудотворная икона Донской Богоматери. Бесстолпный одноглавый храм стал своеобразным памятником русскому воинству, его строгие архитектурные формы впоследствии неоднократно повторялись в русском зодчестве [2]. В XVII веке к храму были пристроены трапезная с колокольней и два придела во имя покровителя Руси преподобного Сергия Радонежского и хранителя русского воинства Федора Стратилата. Храм неоднократно перестраивали. Дошедшая до настоящего времени композиционная структура здания относится к концу XVII в., когда были пристроены южный и северный приделы, трапезная и колокольня [3].

Уникальный ансамбль монастыря сложился на протяжении XVIII–XIX веков: была возведена новая ограда, построены храмы и каменные гражданские постройки. Эти объекты сохранились до наших дней [4].

Объектом исследования в работе является ансамбль Донского ставропигиального мужского монастыря. Предмет исследования – методы осуществления ремонтно-реставрационных работ архитектурного комплекса донского мужского монастыря в 2013–2021 гг.

Целью работы является историко-архитектурное формирование и сохранение комплекса

донского мужского монастыря в процессе проведения комплексных ремонтно-реставрационных работ.

Для достижения цели необходимо решить ряд следующих задач:

- изучение историко-библиографических исследований по Объекту;
- изучение проекта реставрации (на основе проведенных исследований);
- выявление основных проблем современного существования Объекта;
- изучение технологии производства работ.

Материалы и методы. В ходе проведения исследования были изучены архивные, библиографические и иконографические материалы, связанные с изучаемым объектом. После сбора исходных данных была проведена их систематизация и анализ. Анализ подвергались разные аспекты Объекта: его история, расположение, современное состояние, реставрация, использование.

Основная часть. Проведение ремонтно-реставрационных работ на памятниках архитектуры и монументального искусства, расположенных на территории Донского монастыря.

Каменная скульптура – из мрамора и известняка, из песчаника и гранита – ее сохранность в условиях экспонирования на открытом воздухе волнует многих специалистов реставрационного сообщества по всему миру [5].

К сожалению, экологическая обстановка в Москве постоянно оказывает неблагоприятное воздействие на памятники [6], выполненные из натурального камня и хранящиеся на открытом воздухе. Агрессивная кислотно-щелочная среда разрушает надгробия. Мы можем безвозвратно утратить часть историко-культурного наследия без необходимых регулярных реставрационно-консервационных работ.

Комплексные ремонтно-реставрационные работы на территории Донского монастыря были начаты в 2013 году.

Первым объектом научной реставрации стал объект культурного наследия "Ансамбль Донского монастыря, XVI–XIX вв. – "Старый" собор, 1591–1593 гг. Трапезная и приделы, 1678–1679 гг. Шатровая колокольня, конец XVII в." по адресу: Донская пл., д. 1, стр. 19. Перед началом работ были проведены историко-культурные исследования, археографические и архивные изыскания, а также выполнено натурное исследование объекта культурного наследия. В конце 1940-х годов в храме под руководством архитектора-реставратора Н.Н.Соболева были прове-

дены реставрационные работы и сделана попытка вернуть этому сооружению исторический облик [7]. В процессе проведенных работ были восстановлены наличники трапезной и колокольни. Внутри храма были разобраны закладки разгрузочных арок и уничтожена живопись второй половины XIX века. Однако, ввиду того, что храм предназначался для возобновления богослужений, работы не были выполнены в необходимом объеме.

Основной задачей текущей реставрации было раскрытие особенностей этого уникального памятника древнерусского зодчества. В процессе натурных исследований и реставрационных работ были выявлены элементы архитектуры XVI века. При этом реставраторам удалось воссоздать фрагменты фасадов храма XVI в., выходящих в пределы XVII в. Это позволило создать реконструкцию храма на конец XVI в. (автор Г.П. Степаненко). В процессе работ был снят культурный слой вокруг и внутри храма, что позволило вернуть храму с прилегающими пристройками первоначальный облик [8]. Внутри храма архитекторами были выявлены фрагменты первоначальных оконных проемов, они оставлены как археологические зондажи. Такой же прием был применен при реставрации фасадов: на западном фасаде как зондаж показан рисунок портала XVII века, а также наличники окон трапезной. Данный подход отвечает требованиям научной реставрации, когда максимально сохраняются и выявляются подлинные детали памятника.

В соборе были проведены археологические раскопки, позволившие выявить новые захоронения в интерьерах. В процессе проведения работ были отреставрированы чугунные плиты XVIII–XIX вв. некрополя в Старом соборе, зафиксированы места выявленных захоронений, часть из которых удалось атрибутировать. В трапезной проведено восстановление пола из доломитовых плит на первоначальных отметках XVII в.

В трапезной Старого собора с 1948 года и до настоящего времени происходит мироварение [9]. В процессе реставрационных работ была разобрана и выложена заново мироваренная печь с устройством подпольного канала-дымохода.

По итогам проведенных ремонтно-реставрационных работ Старый (Малый) собор признан лауреатом конкурса Правительства Москвы на лучший проект в области сохранения и популяризации объектов культурного наследия "Московская реставрация–2016" в трех номинациях.

Монастырский ансамбль развивался на протяжении нескольких столетий. На его территории находятся разновременные постройки.

В 1806–1809 гг. у южной стены монастырской ограды по проекту архитектора И.В.Еготова возведена Церковь Архангела Михаила. Храм построен на средства княгини А.А.Голицыной во имя небесного покровителя ее супруга М.М.Голицына. Он стал усыпальницей для многих представителей рода Голицыных, включая московского генерал-губернатора Д.В.Голицына и его мать Н.П.Голицыну, которая послужила прототипом главной героини повести А.С.Пушкина [10]. "Пиковая дама". До 1990 г. в здании располагалась экспозиция монументальной скульптуры Музея архитектуры, где были представлены работы Ф.Г.Гордеева, И.П.Мартоса, С.С.Пименова, а также других выдающихся русских и европейских скульпторов [11].

В 2015 году начались реставрационные работы на объекте культурного наследия **"Ансамбль Донского монастыря XVI–XIX вв., Церковь Михаила Архангела, 1806–1809 гг. "Усыпальница Голицыных"** по адресу: Донская пл., д. 1-3, стр. 20.

За время реставрации восстановлено внешнее и внутреннее убранство объекта культового зодчества, в процессе которой восстановлены белокаменный цоколь, штукатурный и лепной фасадный декор. Одной из находок стало раскрытие наличников больничного храма нач. XVIII века, которые оставлены на южном фасаде трапезной как фрагменты более ранней постройки [8]. Особенно интересными были работы по восстановлению северного портика на главном фасаде здания, формы которого были искажены пристройкой XIX века, разобранной во время проведения работ архитектором Н.Н.Соболевым в начале 1950-х годов. Раскрыты заложенные первоначальные дверной проем под портиком главного фасада, а также оконные проемы в виде узких ниш по сторонам от него. В процессе реставрации были найдены остатки металлического пола и ступеней парадного входа, которые также были отреставрированы и восполнены утраты. По материалам химико-технологических исследований храму возвращено первоначальное колористическое решение. Особенно значительной была работа по воссозданию монастырскими резчиками по фотографиям и аналогам деревянного резного иконостаса. Интересно, что по проекту приспособления в местном ряду иконостаса были установлены иконы из ризницы Донского монастыря, происходящие из домово́й церкви во имя Павла Латырского, которая была выстроена на средства П.М.Третьякова в Училище для глухонемых детей на Донской улице. Реставрация монументальной живописи храма проводилась в 1990-е годы, поэтому в настоящее время было выполнено укрепление и расчистка живописи.

Впервые проведена реставрация помещений усыпальницы, где восстановлены южный вход и лестница, а также проведена реставрация интерьеров и сохранившихся плит. Здесь, как и в Старом соборе, проведена комплексная реставрация, включающая не только архитектурную реставрацию, но реставрацию иконописи, монументальной живописи, предметов декоративного убранства храмов (паникадила, ограды, надгробные памятники и др.).

По итогам проведенных ремонтно-реставрационных работ Церковь Михаила Архангела (Усыпальница Голицыных) признана лауреатом конкурса Правительства Москвы "Московская реставрация–2017" в двух номинациях.

В 2019 г. завершена реставрация объекта культурного наследия **"Ансамбль Донского монастыря, XVI–XIX вв. – Баня, XVIII в."** В здании настоятельской бани (кухни), выстроенном в непосредственной близости от Святых ворот в северной части монастыря одновременно с настоятельскими покоем в 1748 году, впервые за многие годы было проведено тщательное исследование. В результате исследования здания было принято решение о воссоздании его первоначального облика и планировки. Реставраторы воссоздали не только скромный декор здания, но и характерную высокую кровлю. В интерьере сохранилась сводчатая палата, а также остатки топочной для печи, что было использовано при осуществлении проекта приспособления.

Реставрационные работы в обители проводятся силами строительно-реставрационного подразделения монастыря, а также других реставрационных организаций, осуществляющих свою деятельность в соответствии с лицензией Министерства культуры РФ по разрешениям Мосгорнаследия. Работы ведутся в соответствии с федеральным законом "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации" от 25 июня 2002 г. № 73-ФЗ. «Для более глубокого консультативного сопровождения реставрационных работ был организован научно-методический экспертный совет по вопросам реставрации и сохранения объектов культурного наследия «Ансамбль Донского монастыря, XVI–XIX вв.». В его состав вошли специалисты, профессионализм которых соответствует уровню культурной значимости объектов обители, включающих памятники архитектуры, монументальной и станковой живописи, мемориальной скульптуры и малых архитектурных форм (надгробия и фрагменты архитектурных сооружений)» [1].

Возрождение уникального ансамбля финансируется из федерального бюджета, бюджета города Москвы и при поддержке благотворителей.

В монастыре действуют реставрационные мастерские по реставрации иконописи, а также мастерская художественной вышивки, мастерицы которой выполнили полотенца в иконостасе Старого собора, а также покровцы и др. литургические предметы в храмах [12].

Необходимо отметить, что отреставрированные объекты изменили восприятие ансамбля, так как одновременно проводились работы по реконструкции инженерных сетей и благоустройству территории. При проведении работ по благоустройству были зафиксированы основные планировочные решения: восстановлены липовые аллеи, образующие планировочные оси ансамбля, восстановлена историческая дорожно-тропиночная сеть, что подчеркивает градостроительную ценность ансамбля [3].

Сегодня продолжается восстановление объекта культурного наследия **"Ансамбль Донского монастыря XVI–XIX вв. 12 башен и 14 прясел крепостной стены, 1686 г., 1687–1698 гг., 1711 г."**. Ограда монастыря, построенная по всем канонам оборонного зодчества XVII в., представляет в плане квадрат. Для эффективного ведения боя угловые (круглые в плане) башни выступают на три четверти из плоскости стены, восемь квадратных башен – наполовину. Башни имеют три яруса. Первый ярус перекрыт сомкнутым сводом с распалубками над окнами и входом. Второй ярус, не сообщающийся с первым, находится на уровне боевого хода; на него можно попасть по внутрискладной лестнице, идущей от уровня земли. На третий ярус, представляющий собой открытую площадку-гульбище, окруженную аркадой, ведет также внутрискладная лестница с уровня боевого хода. Арочное ограждение проемов имеет глухие парапеты с белокаменными балясинами. Всего на территории монастыря находится 12 башен и 14 прясел монастырской ограды [13].

К началу работ башни пришли в аварийное состояние и были непригодны для эксплуатации: кровли башен были выполнены из рубероида с заливкой швов гудроном, что привело к промоканиям сводов и появлению в них деструктивных участков кладки. В нижних ярусах были почти полностью утрачены кирпичные выстилки полов, сгнил деревянный дощатый пол на вторых ярусах.

К настоящему времени отреставрированы башни № 4, № 5, № 11 и № 12. Реставраторы провели комплекс серьезных работ по фасадам и интерьерам башен. Была отремонтирована кирпичная и белокаменная кладки, расчищены все поверхности, заменены столярные заполнения, отреставрирован и покрыт медью декор,

оштукатурены и окрашены стены и своды помещений.

Специалисты раскрыли исторические проемы, выполнили новое покрытие открытой площадки-гульбища на круглой башне, разобрали прогнившие деревянные конструкции пола в интерьерах, установили новые деревянные перекрытия, оконные и дверные столярные заполнения по аналогам XVII века.

В рамках Международных кампусов в восстановлении и расчистке двух башен и благоустройстве монастырской территории принимали участие добровольцы, в том числе волонтеры французского объединения Rempart [14].

Продолжается реставрация объекта культурного наследия **"Ансамбль Донского монастыря, XVI–XIX вв. – "Новый" собор, 1684–1689 гг., 1748 г."** по адресу: Донская пл., д. 1, стр. 12. Собор в центре монастыря заложила в 1684 г. царевна Софья, а продолжил строительство Пётр I.

Необходимо рассказать о главной особенности Донской обители. 2,5 га – практически половину территории монастыря – занимает исторический **некрополь XVIII – начала XX вв.** Это – своего рода музей: величественные памятники, колонны, саркофаги и пирамиды могут рассказать об истории России не меньше иных экспонатов. «Ряд надгробий выполнен выдающимися русскими скульпторами: И.П.Мартосом, В.И.Демут-Малиновским, И.П.Витали и др.» [15].

Есть захоронения кон. XVII века. Расширение некрополя началось в XVIII в., когда императрицей Екатериной II был подписан изданный Сенатом указ от 24 марта 1771 г., запрещавший проводить захоронения в черте Москвы из-за опасности распространения чумы. Согласно указу, хоронить умерших от опасной болезни предписывалось в особых загородных местах. А указ Правительственного Сената от 24 декабря 1771 г. запрещал проводить погребения при церквях во всех городах Российской империи. С этого времени московское дворянство было вынуждено устраивать свои родовые усыпальницы в монастырях, расположенных за границами столицы [16].

В Донском монастыре нашли последний приют князья Голицыны, Долгоруковы и Волконские, дворяне Нарышкины и Глебовы-Стрешневы, захоронены многие выдающиеся представители духовенства, политики, военные, деятели искусства и культуры: историк Василий Ключевский, архитектор Осип Бове, философ и публицист Петр Чаадаев, ученый, "отец русской авиации" Николай Жуковский, участники военных

действий 1812 г., Крымской 1853–1856 гг., Русско-турецкой 1877–1878 гг. и Первой мировой войн. Кладбище быстро стало престижным. В 1930-е гг. здесь были перезахоронены с "приговоренных" к закрытию кладбищ художник Василий Перов, декабрист Петр Свистунов и многие другие известные люди. В 2000 г. в Донской монастырь перенесены останки писателя Ивана Шмелева. В нем также перезахоронены: в 2005 г. – генерал Антон Деникин и философ Иван Ильин, в 2007 г. – генерал Владимир Каппель. В 2008 г. погребен Александр Солженицын.

«Сочетание художественной и исторической значимости позволяет говорить о некрополе Донского монастыря как об уникальном и своеобразном городском ансамбле» [17].

Для сохранения памятников архитектуры, скульптуры, живописи, иконописи и монастырской библиотеки в 1922 году был создан Историко-бытовой музей бывшего Донского монастыря.

В 20-е годы XX века была проведена реставрация художественных надгробий: Пирамиды, надгробия кн. Щербатовых, надгробной плиты Чаадаева, и надгробия поэта Хераскова. В то же время в 1924–1930 годах были разобраны часовни и надгробия, расположенные вблизи Большого собора. Часть надгробий была перенесена на другие участки некрополя. Наряду с металлическими сениями и решетками в металлолом были сданы некоторые бронзовые детали и памятники, выполненные из металла.

В 1929 году Историко-бытовой музей был реорганизован в Антирелигиозный музей искусства (АМИ). Его коллекция пополнялась художественными надгробиями из храмов Москвы и сносимых монастырских кладбищ.

В 1935 году на территории Донского монастыря создается Музей Академии Архитектуры (МАО), в чье ведение переходит некрополь. В первый год работы музея проведены работы по установке 300 опрокинутых надгробий. Созданы тематические выставки, но одновременно Комиссией музея, был составлен список надгробий, подлежащих ликвидации. Этот список был скорректирован в 1936 году, после чего 152 надгробия были уничтожены.

В 1938 году в Донском монастыре была проведена первая научная паспортизация художественных надгробий и памятников на захоронениях известных людей. Через десятилетие, после передачи некрополя в ведение Треста похоронного обслуживания Управления предприятий коммунального обслуживания Мосгорисполкома, музей формирует Инвентарную опись его надгробий и захоронений.

В 1954 году, когда некрополь вновь перешел в ведение Музея Академии архитектуры СССР, по инвентарной ведомости было принято 1941 надгробие (новые захоронения имели самостоятельный учет).

В соответствии с постановлением Совета Министров РСФСР от 1960 года и решением Моссовета от 1970 года 27 могил (и памятников) выдающихся лиц, погребенных на некрополе Донского монастыря, были взяты под государственную охрану. Остальные памятники оставались под наблюдением Государственного научно-исследовательского музея архитектуры им. А.В. Щусева, статус филиала которого территория обители получила в 1964 году, после объединения Музея Академии архитектуры СССР и Музея русской архитектуры им. А.В. Щусева. Музей архитектуры им. А.В. Щусева начал осуществлять программу комплексной реставрации некрополя, но из-за недостаточного финансирования эта программа не была выполнена в полном объеме.

Силами Музея архитектуры в 1959 г. были начаты реставрационные работы по надгробиям некрополя Донского монастыря. Согласно справке, составленной в 1981 году А.Н. Луполом, которая хранится в Центральном государственном архиве г. Москвы, в 1959–1964 гг. проводились противоаварийные работы, восстановление утраченных завершений памятников (урн, крестов и пр.). Работы выполняли штатные реставраторы музея. С 1965 г. реставрацию надгробий некрополя вели сотрудники Московской городской реставрационной мастерской ВООПИК под наблюдением реставраторов музея [18].

В 1969 году был снят топографический план некрополя, соответствующий Инвентарной описи 1954 года. Территория некрополя была разделена на 10 участков, на которых были установлены информационные щиты с указанием экспонируемых надгробий.

В период 1969–1973 гг. была проведена фотофиксация памятников некрополя, на основе которых сформирована фототека.

С 1969 г. все работы на некрополе рассматривались на Реставрационном совете музея, определявшем реставрационное задание и осуществлявшем их приемку. Всего с 1969 года по 1981 год было восстановлено 322 памятника. Работы проводились комплексно – по участкам, за исключением аварийных объектов, по которым необходимо было принять срочные меры.

В 1997 году некрополь Донского монастыря получил статус выявленного объекта культурного наследия (ансамбль) "Некрополь Донского монастыря, XVIII–XX вв." (Протокол заседания

Экспертной комиссии по вновь выявленным памятникам истории и культуры при УГК ОИП города Москвы (секция "Исторический некрополь" от 25 декабря 1997 г. № 4). В настоящее время по-объектный состав некрополя полностью не утвержден, таким образом, все надгробия и захоронения, расположенные на его территории, охраненный статус которых не определен, также являются выявленными объектами культурного наследия.

С 2011 года по сегодняшний день по заказу Мосгорнаследия (ГКУ "Мосреставрация") ведутся комплексные работы по реставрации художественных надгробий некрополя.

В 2011 году силами специализированных организаций проведены работы по реставрации 55 художественных надгробий, в 2012 году – 11 художественных надгробий, в 2016–2018 годах – 23 художественных надгробий.

В 2019 году Мосгорнаследием приняты работы по реставрации 28 художественных надгробий, в 2020 году – 7 художественных надгробий.

ООО "АРТ-реставрация" с 2011 года проведены работы по восстановлению 47 захоронений.

С 2017 г. реставрация памятников Донского некрополя проводится ООО "Реставрационная Мастерская "Наследие". Всего отреставрировано 88 памятников. В их числе – памятники, пострадавшие во время ураганов 2017 и 2018 гг.

Реставрационные работы, проводимые на художественных надгробиях, являются сложным и трудоемким процессом. Они выполняются в стесненных условиях, с минимальным набором механизации или вручную, на открытом воздухе с соблюдением условий температурно-влажностного режима. Для восстановления исторического облика памятников часто приходится их предварительно демонтировать. Кроме того, реставрация памятников Донского некрополя имеет свои особенности. Многие фрагменты надгробий для их сохранности были демонтированы еще Музеем архитектуры. При проведении реставрации архитекторы возвращают подлинники на их историческое место.

Методика работы по восстановлению объектов некрополя так же, как и памятников архитектуры, включает этапы:

1. историко-библиографическое исследование памятника, его обмеры, технологическое исследование материалов и оценку состояния;
2. подготовку проекта реставрации (на основе проведенных исследований);
3. производство работ.

Общие виды проведенных работ по реставрации художественных надгробий включают: устройство и усиление фундаментов, выравнивание памятников, расчистку поверхностей (из

натурального камня, металла), удаление активных очагов коррозии, отделку поверхности методом патинирования, заделку трещин и отверстий, восстановление текстов посвятительных надписей и декоративных элементов памятников, а также работы по реставрации металлических оград и сеней.

Подход к восстановлению памятников был индивидуальным, с учетом состояния каждого из них. Например, «Надгробный памятник Тутолминым, созданный скульптором И.П. Витали, по праву считается одним из лучших произведений русского мемориального искусства» [17]. Пропавший с его саркофага в 30-е годы ангел сохранился и был найден в середине прошлого столетия в соборе одного из соседних кладбищ. По фотографиям были восстановлены утраченные крылья. Из искусственного камня изготовлены другие разрушенные элементы надгробия. Проведены работы по реставрации саркофага, установленного на постаменте, а также удалены металлические скобы, которые при расширении металла разрывают камень. Реставрационные работы проводятся под контролем специалистов Мосгорнаследия.

Заключение. За последнее столетие Донскому монастырю, одному из самых почитаемых в Москве, пришлось пережить серьезные преобразования – от упадка и разрушения в начале прошлого века до возрождения в наши дни. Историческая память о великих событиях увековечена в стенах его соборов, церквей и часовен.

Исторический некрополь Донского монастыря является полноправным объектом исторических исследований, изучение которого важно не только само по себе, но и как часть истории искусства и истории градостроительства, по его коллекции можно изучать архитектурные стили, познавать Российскую историю, исследовать новейшие виды и методы реставрационных работ.

Начавшиеся в 2013 году комплексные реставрационные работы ансамбля Донского ставропигиального мужского монастыря были направлены на сохранение и общее изучение историко-архитектурного формирования всего ансамбля. Проведены реставрационные работы на соборах, на стенах и башнях всего комплекса, кроме того, большое внимание было уделено выявлению художественных надгробий в аварийном состоянии. Комплексный подход к сохранению всей территории ансамбля это яркий и уникальный пример реализации научной реставрации на территории действующего монастыря с учетом сохранения всех памятников, а также возвращения зданиям исторического предназначения. В настоящее время восстановление Объекта продолжается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донской монастырь (юбилейная книга). М.: Изд-во Донского ставропигиального монастыря г. Москвы, 2015. 800 с.
2. Никон (Головкин), Божутина Т., Стародубцев О. Донской ставропигиальный мужской монастырь: путеводитель. М.: Донской ставропигиальный мужской монастырь, 2014. 32 с.
3. Аренкова Ю.И., Мехова Г.И. Донской Монастырь: Историко-архитектурный очерк. М.: Изд-во Искусство, 1970. 159 с.
4. Robert K. Massie. Peter the Great: The compelling story of the man who created modern Russia, founded St Petersburg and made his country part of Europe. Publishing house Head of Zeus, 2012. P. 230–248.
5. Watt J., Tidblad J., Kucera V., Hamilton R. The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage, 2009, New York, USA. P. 5.
6. Mezentzev S. Ecology of Moscow urban agglomeration: problems and the ways of solving. XXIV International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021), 2021. Vol. 263.
7. Донской монастырь как музей в советские годы. ЦГАМО Ф. 966, оп. 4, д. 1028.
8. Отчетная документация ООО АРМ «ФаросЪ» о выполнении работ по сохранению объекта культурного наследия, 2016. М. 211 с.
9. Донской ставропигиальный мужской монастырь // Святые Православной Москвы. Альбом. М.: Издательство Московской Патриархии. 1997. С. 190–201.
10. Рязанов А.М. Усыпальница князей Голицыных в церкви Архангела Михаила на территории Донского монастыря // Монастыри в жизни России: Материалы научной конференции, посвященной 600-летию преподобного Пафнутия Боровского и 550-летию основания им Рождества Богородицы Пафнутиево-Боровского монастыря (19-20 апреля 1994 года) // Составитель Осипов В.И. Калуга-Боровск. 1997. С. 115–120.
11. Монастырь как музей в 1920–1930 гг. Архив ГНИМА им. А.В. Щусева. Фонд 1.
12. Monasteries in Moscow: Novodevichy Convent, Krutitsy, Donskoy Monastery, Danilov Monastery, Marfo-Mariinsky Convent, St. Andronik Monastery. Publisher Books LLC, Wiki Series, 2011. P. 74
13. Донской монастырь: История и современность. М.: Сборник научных трудов ГНИМА им. А.В. Щусева, 1996. С. 4–19.
14. Mathis Stock. Progress in French Tourism Geographies: Inhabiting Touristic Worlds. Publisher Springer Nature, 2021. 244 p.
15. Артамонов М.Д. Кладбище Донского монастыря (Отечественные некрополи) // Памятники Отечества. 1986. № 1 (13). С. 95–104.
16. Каршилов Е. Донской монастырь. М.: Донской ставропигиальный мужской монастырь, УКИНО «Духовное преображение», 2012. 94 с.
17. Домбровский И.Е. Некрополь Донского монастыря. М.: Изд-во Минувшее, 2007. 266 с.
18. Луппол А.Н. Герои Отечественной войны 1812 года // Путеводитель по некрополю Донского монастыря. 1988. Изд-во Москва. 28 с.

Информация об авторах:

Логинова Юлия Алексеевна, заместитель руководителя Департамента культурного наследия города Москвы, аспирант, Московский архитектурный институт (Государственная академия). E-mail: loginova_rest@mail.ru, Департамента культурного наследия города Москвы. Россия, 115035, Москва, Пятницкая улица, 19.

Поступила 03.11.2021 г.

© Логинова Ю.А., 2022

Loginova Y.A.

Department of Cultural Heritage of the City of Moscow

E-mail: loginova_rest@mail.ru

THE HISTORY OF THE REPAIR AND RESTORATION WORKS OF THE ARCHITECTURAL COMPLEX OF THE DONSKOY MONASTERY IN 2013-2021

Abstract. The article is devoted to the comprehensive scientific restoration of architectural monuments and historical necropolis located on the territory of one of the most famous monasteries of the country – the Donskoy Stavropegial men's Monastery. The problem of the preservation of stone sculpture (marble, limestone, sandstone, granite) in an aggressive acid-alkali environment, exposed to the open air is raised. It sets out the main restoration principles and methods applied to specific monuments. In addition, it lists the types of work consistently undertaken by restorers to save architectural objects on the example of the Old (Small) Cathedral, the Church of Michael Archangel (the Tomb of the Golitsyns), towers, a monastery bath of the XVIII century, as well as works of

monumental art, artistic tombstones of the old Don Cemetery. It is noted that many tombstones made by outstanding masters have given the Don Necropolis the fame of the Open Air Museum. The special value of his collection is emphasized, it is possible to study architectural styles, to learn Russian history, to study complexes of monuments of cult, civil, fortification architecture, objects of monumental art and archaeological heritage, as well as to explore the latest types and methods of restoration work. The restorers have been working diligently for many years to restore the entire ensemble. The information presented in the article may be useful for restorers-practitioners and historians- ethnographers.

Keywords: cultural heritage, monument, restoration, monastery, necropolis, recovery.

REFERENCES

1. Donskoy Monastery (jubilee book) [Donskoj monastyr' (yubilejnaya kniga)]. Moscow: Publishing house of the Donskoy Stavropol Monastery of Moscow, 2015. 800 p. (rus)
2. Nikon (Golovko), Bozhutina T., Starodubtsev O. Donskoy Stavropol Monastery: a guide [Donskoj stavropigial'nyj muzhskoj monastyr': putevoditel']. M.: Donskoy Stavropol Monastery, 2014. 32 p. (rus)
3. Arenkova Yu.I., Mekhova G.I. Donskoy Monastery: Historical and architectural essay [Donskoj Monastyr': Istoriko-arhitekturnyj ocherk]. Moscow: Publishing House Art, 1970. 159 p. (rus)
4. Robert K. Massie. Peter the Great: The compelling story of the man who created modern Russia, founded St Petersburg and made his country part of Europe. Publishing house Head of Zeus, 2012. 230–248 p.
5. John Watt, Johan Tidblad, Vladimir Kucera, Ron Hamilton. The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage, 2009, New York, USA. 5 p.
6. Sergey Mezentzev. Ecology of Moscow urban agglomeration: problems and the ways of solving. XXIV International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2021), Vol. 263. 2021.
7. The Donskoy Monastery as a museum in the Soviet years [Donskoj monastyr' kak muzej v sovetskie gody]. TSGAMO F. 966, inv. 4. 1028. (rus)
8. Accounting documentation of LLC ARM "Faros" on the performance of works on the preservation of the object of cultural heritage [Otchetnaya dokumentaciya OOO ARM «Faros» o vypolnenii rabot po sohraneniyu ob"ekta kul'turnogo naslediya], 2016. M. 211 p. (rus)
9. Donskoy Stavropol male monastery. Shrines of Orthodox Moscow [Donskoj stavropigial'nyj muzhskoj monastyr'. Svyatyni Pravoslavnoj Moskvj]. 1997. Album. M.: Publishing House of the Moscow Patriarchate. 190–201 p. (rus)
10. Ryazanov A.M. The tomb of the Princes Golitsyns in the Church of Archangel Michael on the territory of the Donskoy Monastery [Usypal'nica knyazej Golitsynyh v cerkvi Arhangela Mihaila na territorii Donskogo monastyrya]. Monasteries in the life of Russia: Materials of a scientific conference dedicated to the 600th anniversary of St. Paphnutius of Borovsky and the 550th anniversary of the founding of the Nativity of the Theotokos of the Paphnutius-Borovsky Monastery (April 19-20, 1994). Compiled by Osipov V.I. Kaluga-Borovsk. 1997. Pp. 115–120. (rus)
11. The monastery as a museum in the 1920s and 1930s. Archive of NJIMA A.V. Shchuseva. Foundation 1. (rus)
12. Monasteries in Moscow: Novodevichy Convent, Krutitsy, Donskoy Monastery, Danilov Monastery, Marfo-Mariinsky Convent, St. Andronik Monastery. Publisher Books LLC, Wiki Series, 2011. 74 p.
13. Donskoy Monastery: History and Modernity [Donskoj monastyr': Istoriya i sovremennost']. Moscow: Collection of scientific works of the A.V. Shchusev GNIM, 1996. Pp. 4–19. (rus)
14. Mathis Stock. Progress in French Tourism Geographies: Inhabiting Touristic Worlds. Publisher Springer Nature, 2021. 244 p.
15. Artamonov M.D. Cemetery of the Donskoy Monastery (Domestic necropolises) [Kladbishche Donskogo monastyrya (Otechestvennye nekropoli)]. Monuments of the Fatherland. 1986. No. 1 (13). Pp. 95–104. (rus)
16. Karshilov E. Donskoy Monastery [Donskoj monastyr']. M.: Donskoy Stavropol Monastery, Publishing House Spiritual Transfiguration, 2012. 94 p. (rus)
17. Dombrovsky I.E. Necropolis of the Donskoy Monastery [Nekropol' Donskogo monastyrya]. M.: Publishing House of the Past, 2007. 266 p. (rus)
18. Lupp A.N. Heroes of the Patriotic War of 1812 [Geroi Otechestvennoj vojny 1812 goda]. Guide to the necropolis of the Donskoy Monastery. 1988. Moscow Publishing House. 28 p. (rus)

Information about the authors:

Loginova, Yulia A. Deputy Head of the Department of Cultural Heritage of the City of Moscow, graduate student Moscow Architectural Institute (State Academy). E-mail: loginova_rest@mail.ru, Department of Cultural Heritage of the City of Moscow. Russia, 115035, Moscow, st. Pyatnitskaya, 19.

Received 03.11.2021

Для цитирования:

Логинова Ю.А. История осуществления ремонтно-реставрационных работ архитектурного комплекса Донского мужского монастыря в 2013–2021 гг. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 41–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-41-49

For citation:

Loginova Yu.A. The history of the repair and restoration works of the architectural complex of the donskey monastery in 2013-2021. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 41–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-41-49

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-50-59

Бергман А.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: Anastasiabergman2018@gmail.com

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ СТАНИЦЫ СТАРОЧЕРКАССКОЙ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В статье дается анализ формирования казачьей станицы на прибрежной территории реки Дон в историческом и архитектурно-композиционном контексте. Рассмотрена ретроспектива формирования станицы Старочеркасской с XVIII в. по настоящее время. В фокусе внимания автора оказываются как архитектурно-композиционные аспекты, так и исторические предпосылки, влияющие на становление образа станицы. Помимо указанных предпосылок, выявлены основные социальные аспекты, оказавшие влияние на интеграцию прибрежной территории в структуру малого исторического поселения (станицы).

Для прибрежной территории станицы Старочеркасской автор выделяет 3 ключевых периода формирования и интеграции в структуру поселения: 1. период в течение XVIII века, 2. период с XIX до сер. XX века, 3. период со второй половины XX века по настоящее время. Детально рассмотрен каждый из выделенных периодов, имеющий большое значение в процессе формирования станицы Старочеркасской, и в частности прибрежной территории как наиболее важного компонента в структуре поселения.

На основе анализа исторического картографического материала сформулированы 5 базовых принципов формирования структуры казачьего поселения и обозначена роль прибрежной территории в этом процессе.

Ключевые слова: станица Старочеркасская, архитектурно-композиционный контекст, этапы формирования поселения, прибрежная территория, река Дон, казачьи станицы.

Введение. В рамках актуальных национальных проектов Российской Федерации выделяется масштабный проект по оздоровлению реки Дон – крупнейшей реки Ростовской области. В рамках этого проекта планируются ряд работ, связанных с речным руслом (его расчистка и углубление, строительство Багаевского гидроузла и т.д.) до 2030 года. Поэтому очень важно сфокусировать внимание профессионального сообщества, администрации и жителей Ростовской области на развитии прибрежных территорий, непосредственно связанных с рекой Дон. Особенно остро вопрос развития таких территорий стоит в малых городах и поселениях. Для того, чтобы разработать стратегии развития данных территорий важно опираться на исторический контекст: а именно выявить базовые аспекты формирования прибрежной территории в структуре малого исторического поселения (станицы). В рамках этой публикации автором рассматривается прибрежная территория станицы Старочеркасской, расположенной на берегу реки Дон в Ростовской области.

Целью исследования является выявление принципов формирования станицы Старочеркасской, связанных с включением прибрежной территории в структуру поселения.

Методология исследования, используемая в данной статье, базируется на историческом и сравнительном анализе картографических и биб-

лиографических данных, обзоре научной информации, содержащейся в электронных ресурсах, систематизации собранных данных. На основании собранного материала проводится фиксация этапов планировочной эволюции станицы Старочеркасской при помощи графоаналитического и классификационного методов.

Основная часть. Ключевые исторические предпосылки формирования прибрежной территории Черкасского городка (станицы Старочеркасской).

Старочеркасская станица (Старочеркасск) носила имя Черкасского городка до 1805 года – казачьего городка, объединившего несколько станиц. В XVI – начале XVIII века на Дону сложилась независимая казачья община. Жили казаки в городках, первое упоминание о которых относится к 1549 году. Первые казачьи городки появились в середине XVI века в районе Волго – Донской перемычки и в низовьях Дона у донецких раздор [1]. В 1622 году столицу казачества перенесли в Монастырский городок, затем в 1637 году в Азов. Черкасск становится столицей казачества с 1644 года, хотя первое упоминание о городке относится к 1593 году. О первоначальном архитектурном облике Черкасского городка сохранилось не много упоминаний. Общий вид Черкасского городка был сходен по структуре с

казачьими городками XVI–XVII века. Он располагался на острове и имел деревянное (тын или плетень) ограждение по внешнему контуру [2].

Важным условием формирования казачьего сообщества являются особенности организации ландшафта Донской земли и непростые природные условия. Расположение поселений на равнине вдоль реки обусловлено высокой потребностью людей в воде – водные ресурсы дают возможность организации самого быстрого транспорта (на тот момент), рыбной ловли и другие функциональные преимущества. Именно водные объекты – реки, лиманы, озера, ерики, протоки положительно влияют на условия жизни людей в условиях жаркого сухого климата, а также становятся градообразующим началом казачьих поселений, находящихся вдоль рек, на островах, и оказывают влияние на архитектурно-планировочные и композиционные принципы их формирования

К началу XVII века Черкасский городок принадлежал к числу крупных казачьих городков. В большинстве городков проживало около 300 человек, а в Черкасском – несколько тысяч. Как профессиональные военные, казаки использовали существующие природные условия для защиты своих городков – для их основания они выбирали наиболее защищенные места близ поймы реки, то есть река становилась активным компонентом защиты поселения. При этом активность реки во время сезонного половодья играла отрицательную роль для станиц – крупные наводнения уничтожали большинство построек, и казакам вновь приходилось отстраивать станицы, но с учетом границы наводнения. На протяжении 18

и 19 столетия происходили самые серьезные наводнения в Черкасском городке. Речь идет о наводнениях 1740, 1773, 1775, 1786, 1820, 1845, 1849 и 1880 годов. В эти трудные для городка времена единственным способом передвижения являлись лодки. В 1866 году была сооружена гавань (защитная стена) от наводнений близ Воскресенского собора. Но, несмотря на это, наводнения продолжались, и поистине самым масштабным является наводнение, произошедшее в 1917 году в течение четырех месяцев. В тот год уровень воды поднялся на 570 сантиметров, что послужило причиной затопления железнодорожного полотна, связывающего Ростов и Новочеркасск. И только к середине XX века, в 1950-х годах уровень воды в реке Дон был взят под контроль при помощи строительства Цимлянского водохранилища. Таким образом, можно отметить, что жизненный цикл реки Дон напрямую влиял на формирование планировочной структуры Черкасского городка: расположение станиц на островах, в низинах и топях по мере укрепления казачьего сообщества и уменьшения военной опасности постепенно меняется на более благоприятное размещение на сухих, незатопляемых участках.

К началу 18-го столетия в состав Черкасского городка входили 12 станиц: Черкасская, Прибыльская, Дурновская, Скородумовская, Татарская, Средняя, Ратнинская, Верхне-Рыковская, Средне-Рыковская, Нижне-Рыковская, Павловская и Тютюревская [3]. Таким образом, Черкасский городок был разделен на 12 административных районов-станций, окруженных крепостной стеной с бастионами (рис. 1).

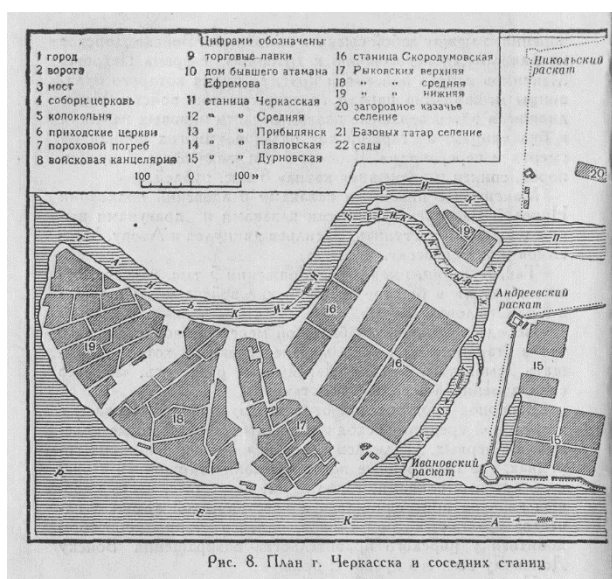
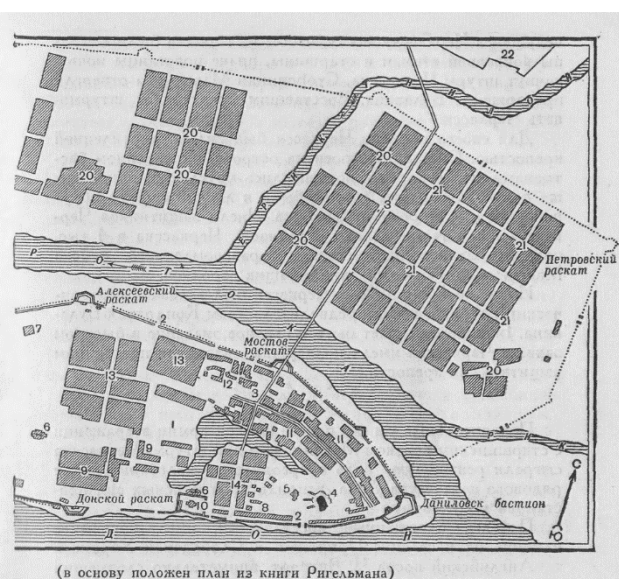


Рис. 8. План г. Черкаска и соседних станиц



(в основу положен план из книги Ригельмана)

Рис. 1. План г. Черкаска и соседних станиц (в основу положен план из книги А.И. Ригельмана «История о донских казаках», 1846 г.)
(источник: <https://storozg.bahmut.tv>)

К середине XVIII века общая протяженность крепостных стен (каменных и деревянных) оставляла 2300 метров, а в центральной части городка располагались 2 каменных бастиона (Даниловский и Иловайский) и 4 деревянных. Следует отметить, что Даниловский бастион и два раската – Ивановский и Донской выходили непосредственно к пойме реки Дон (рис. 1).

Если говорить о градостроительной схеме Черкасского городка, то следует упомянуть ее важную характеристику, отмеченную архитектором А.Г. Лазаревым – этот казачий городок имел прямоугольную квартальную планировку. О таком типе формирования кварталов свидетельствуют сохранившиеся архивные документы [4].

Социальные аспекты, влияющие на формирования структуры прибрежной территории.

В произведениях казачьего фольклора особенно четко можно проследить важную роль реки Дон в жизни казаков. «Река олицетворяла собой войско от верховий до низовий. Съезд всей реки означал сбор всего войска» [7]. Широко на Дону употребляют выражения «Дон-батюшка», «Дон-кормилец». Действительно, река для казаков – родная стихия, источник жизни и возможность движения и развития (военные походы). Примечательно также и то уважительное отношение, которое было у казаков к коням. Считалось, что нельзя запрягать здоровых лошадей в кареты и повозки, так как хомут оскорбляет достоинство лошади, поэтому все грузы перевозили по воде и частично на быках [5]. Эти устойчивые социальные стереотипы в казачьем сообществе, несомненно, повлияли на степень вовлеченности речного транспорта для грузоперевозок, в то время как в большинстве Российских поселений жители отдавали предпочтение гужевой тяге для этих целей.

Другой социальный аспект, повлиявший на развитие прибрежной территории Черкасского городка – торговля. Казаки Войска Донского успешно реализовали значительные гарантии (беспошлинная торговля), дарованные им Российским Правительством в 1615 году [3, 12]. Период со второй половины XVII века и до конца XVIII века был для Черкасского городка временем самой активной торговли не только с русскими, но и с иностранными купцами. Благодаря водным связям через Дон, к Черкасску имели возможность причалить корабли из Азии, Греции и Турции, из Кавказских земель. Однако учрежденная в 1749 году таможня в Черкасске (по Указу Императрицы Елизаветы Петровны), не вызвала у казаков положительного отклика. Традиционно свободолюбивые донцы видели в этом указе посягательство русского правительства на привилегии относительно торгового процесса, полученные казаками ранее. Поэтому они отправляют прошение об отмене этого указа, и вскоре получают одобрение от Императрицы. Позднее в этом же году издается указ об основании новой таможни – Темерницкой, таможни близ крепости Св. Димитрия Ростовского [2]. Но именно это решение ознаменовало утрату столичного статуса Черкасского городка.

По наблюдениям академика С.Г. Гмелина, с 70-х годов XVIII века значительная часть турецких грузов направляется через Темерницкую таможню. Несмотря на этот факт, в своем рапорте от 1801 года Александру I атаман М.И. Платов написал о необходимости закрепить в казачьем социуме на законодательном уровне новую категорию – «торговые казаки». Император одобрил эту инициативу, что укрепило торговлю для донских казаков в качестве ведущего промысла.

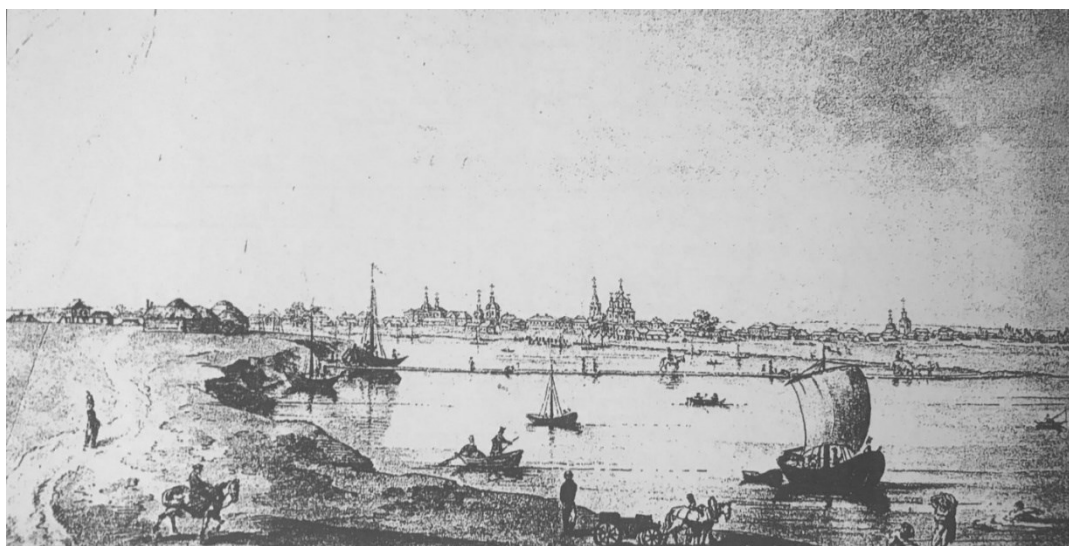


Рис. 2. Корнеев Е. Вид города Черкаска 1803 г.
(Источник: https://geo.1sept.ru/view_article.php?id=200402405)

За более чем полутора вековую торговую историю территория Черкасского городка активно развивалась и застраивалась новыми строениями – лавками, харчевнями и питейными станичными домами. Благоустраивалась и прибрежная территория – от строительства причалов для торговых целей до создания променада для станичных жителей.

Несмотря на перенос столицы Войска Донского из Черкаска в Новочеркасск в 1805 году, большая часть торговых казаков осталась в Черкасске (теперь Старочеркасске) и других станицах на берегу Дона, так как новая столица не имела прямого доступа к главной водной артерии, по которой продолжало проходить движение торговых судов.

Помимо оставшейся торговой активности, доброй традицией стала ежегодная Ильинская ярмарка в Старочеркасске – 20 июля в станицу приезжали жители окрестных станиц и иногородние. Станица преображалась – после посещения церкви, посетители ярмарки гуляли по улицам, по набережной...[3]

В 70-х годах XIX века для прибрежной территории Старочеркаска меняется функциональный баланс – набережная почти утратила торговую функцию (порт), при этом возобновив рекреационную функцию. С этого периода набережная принимает туристов, приезжающих в Духовную Столицу казачества, а также посетителей ярмарок. В подтверждение этому факту также выступают сведения, иллюстрирующие интенсивное развитие других торгово-промышленных центров Области Войска Донского – Ростова, Нахичевани, Таганрога, население которых обладало значительной гражданской свободой по сравнению с казаками [2].

Основные положения анализа аспектов формирования прибрежной территории станицы Старочеркасской.

Перенос таможни из Черкасского городка (Крепость Св. Анны), формирование новых центров (Темерницкая таможня, затем Ростов-на-Дону) являются логичным продолжением концепции эксцентричного типа расселения, предложенной М. А. Рыболовой [7]. Также в рамки этой концепции органично встраивается перенос столицы казачества на новое место – в Новочеркасск, план которого 12 ноября 1804 года составили инженер-генерал Ф. П. де Волан и атаман Платов [8, 10].

Таким образом, станица Старочеркасская утратила ряд важнейших функций:

– оборонительную (функцию Южного форпоста России)

– функцию административного и экономического центра

При этом станица сохранила функции духовного и исторического центра Донского казачества.

В отношении формирования архитектурной среды следует отметить, что река Дон благодаря научному авторитету Птолемея много веков подряд (вплоть до XVIII века) представлялась в мировоззрении древних ученых (Полибий, Страбон, Помпоний Мела) как граница Европы и Азии [1]. Поэтому освоение прибрежной территории Дона в ранний период формирования станицы Старочеркасской (как и других станиц и казачьих городков) представляется как освоение опасных, неизведанных пограничных территорий. После исчезновения разрушенных греческих городов в процессе многочисленных войн, в архитектурной среде на территории вдоль реки Дон отсутствовали какие-либо градостроительные или стилистические маркеры, на которые опирались бы казаки при строительстве своих поселений [1]. Поэтому анализ планировочной структуры и места прибрежной территории в ней ограничен периодом основания Черкаска и до наших дней.

Результаты. На основании обзора источников научной, исторической и краеведческой литературы, а также ретроспективного анализа картографического материала было выделено 3 этапа формирования структуры прибрежной территории:

1. Период в течение XVIII века (рис. 3)
2. Период с XIX до середины XX века (рис. 4)
3. Период со второй половины XX века по настоящее время (рис. 5)

Для первого периода (рис.3) характерно формирование центра станицы близ речной поймы. Центром городка становится остров, отделенный от материковой части протоками. На острове располагаются (начиная с плана 1767 г) основные станицы казачьего городка Черкаска - Черкасская, Прибыльская, Дурновская, Татарская, Средняя, а также торговые лавки. В этот период прибрежная территория реки Дон служит базовой точкой для основания структуры поселения (каркаса), а также приобретает транспортную (буферную) функцию.

Для второго периода с XIX до середины XX века характерно формирование основной ткани расселения. В этот период создаются основные жилые и общественные здания, окончательно формируется торговая функция прибрежной территории. Важным аспектом становится корректировка положения русла реки Дон вследствие многочисленных циклов сезонного половодья. Одновременно с этими процессами корректиру-

ется форма и структура застройки, а также подбирается оптимальное положение с учетом циклов жизни реки.

Знаковым событием, повлиявшим на формирование прибрежной территории станицы Старочеркасской со второй половины XX века по

настоящее время (третий период) является строительство Цимлянского водохранилища. Именно благодаря его основанию получилось сбалансировать уровень воды в реке Дон, а также прогнозировать этот уровень в период сезонного половодья.

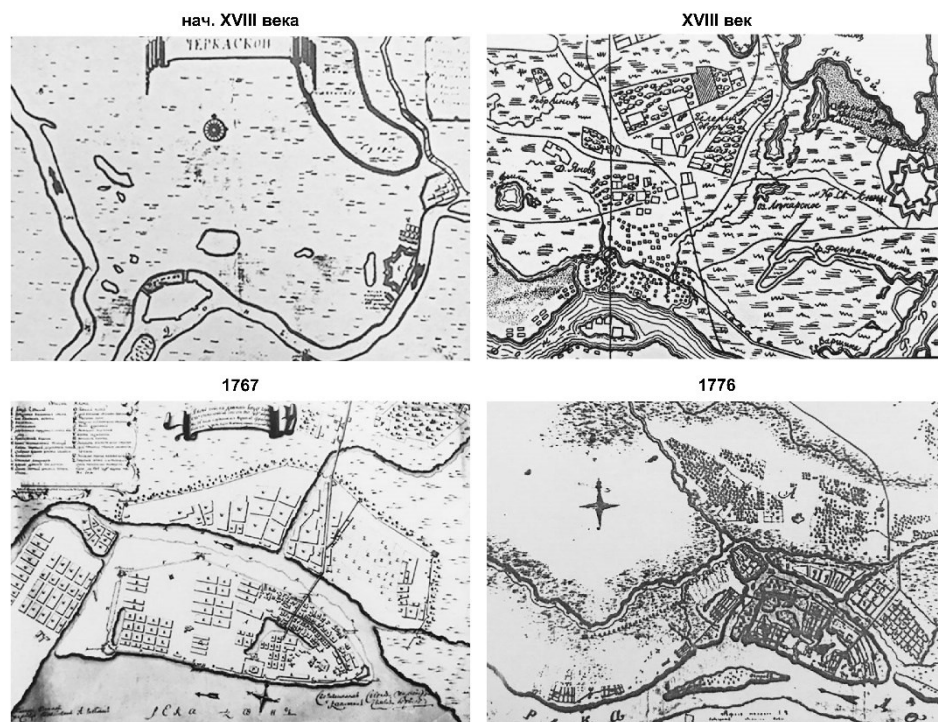


Рис. 3. Схемы (карты) первого этапа формирования прибрежной территории Станицы Старочеркасской в XVIII веке
(Источник: <https://www.etomesto.ru>)

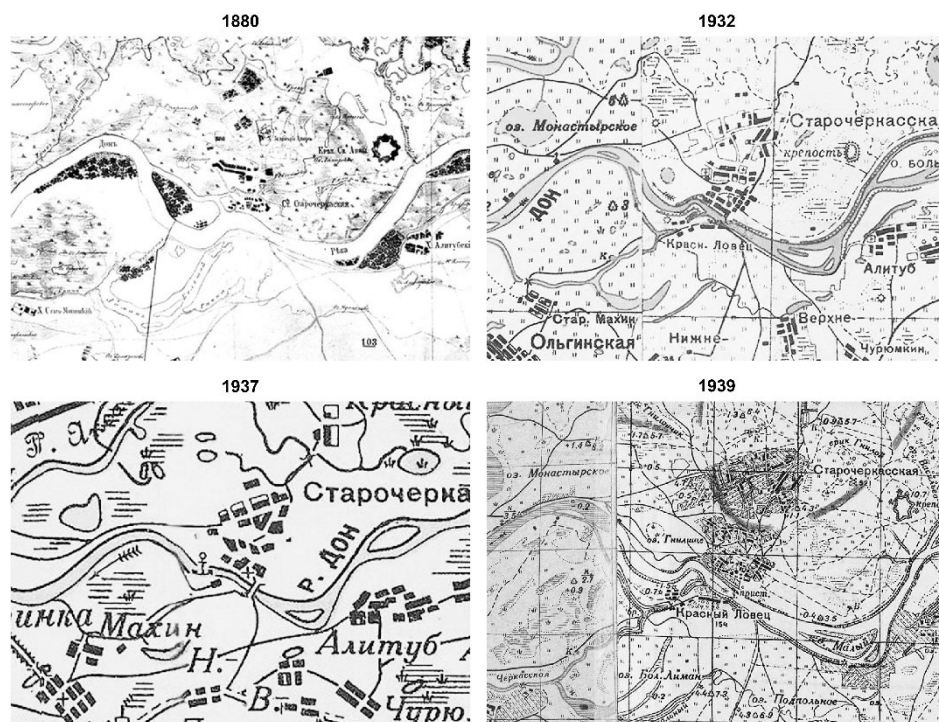


Рис. 4. Схемы (карты) второго этапа формирования прибрежной территории Станицы Старочеркасской с XIX до середины XX века
(Источник: <https://www.etomesto.ru>)

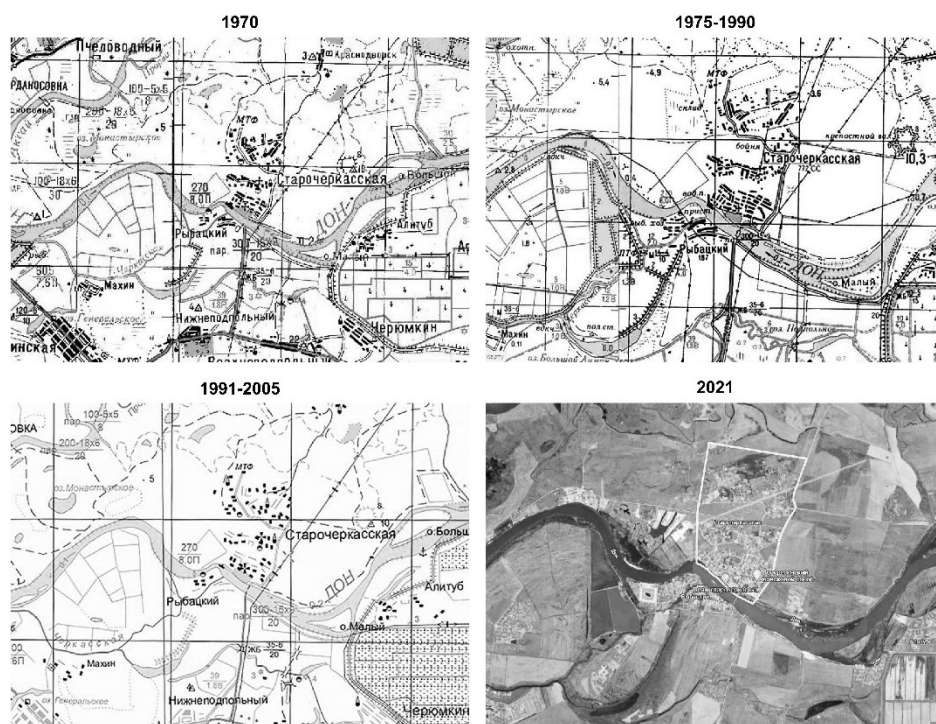


Рис. 5. Схемы (карты) третьего этапа формирования прибрежной территории Станицы Старочеркасской со второй половины XX века по настоящее время
(Источник: <https://www.etomesto.ru>)

Выводы. На основании вышеизложенного материала были выделены следующие принципы формирования станицы Старочеркасской, связанные с включением прибрежной территории в структуру поселения (рис. 6):

1. Принцип формирования территории станицы «вне контекста античной архитектуры». Архитектура эпохи античности в Приазовье, Причерноморье и на нижнем Дону, будучи практически уничтоженной, не оказала прямого влияния на формирование стилистики построек последующих эпох. Исчезновение разрушенных греческих городов и селений, многочисленных зданий и сооружений создало непреодолимый рубеж и прервало наметившуюся линию развития ордерной традиции [1]. В отсутствии сохранившейся архитектурной среды (античные поселения) на первый план при формировании станицы выходят природные факторы (расположение казачьего поселения относительно реки, включение пойменных территорий в структуру планировочного каркаса поселения).

2. Принцип восприятия реки как неотъемлемой части культурной идентичности казаков.

Базой для формулирования этого принципа является культурологический аспект - роль реки в духовной культуре казаков. В культуре южных стран в целом образ воды является основным символом жизни – антитезой к испепеляющей степной жаре и засухе. Образы «Дон-Ба-

тюшка», «Дон-кормилец» являются частью казачьего фольклора (песен, сказаний, поговорок и т.д.), который представляют собой основу культуры казачества.

3. Принцип формирования планировочной структуры «казачьего городка» - как классического архетипа крепости, переосмысленного с учетом региональных факторов.

Планировочная структура казачьего городка имела все элементы, присущие традиционным крепостям – артикулированный центр (площадь для собраний казачьего круга, часовня (позднее церковь), дом казачьего управления, рынок), периферия (жилая часть) и магистрали (транспортные артерии). Пространственная граница фиксировалась плетнем (региональные материалы). Важным аспектом являлся учет особенностей ландшафта, то есть использование защитной функции реки и ее притоков (ериков, лиманов и пр.).

4. Принцип естественной корректировки границы поселения.

Для этого принципа следует отметить, что циклы весеннего половодья реки Дон являлись фактором, формирующим геопозицию городка относительно поймы. Долгое время сохранявшаяся военная опасность не давала казакам возможности переходить на другие открытые территории, поэтому взамен снесенного наводнением строили другой городок вблизи прежнего. Также

важным фактором в этом ключе является близость Дона для рыболовства – одного из важных промыслов казаков.

5. Принцип создания устойчивых магистральных связей.

В развитии станицы Старочеркасской следует выделить нарастающую важность роли прибрежной территории в транспортном сообщении. Для оперативной связи с ближайшими поселениями казаки использовали именно реку – оповеще-

ния о чрезвычайных ситуациях, так как этот способ был более эффективным в отличие от связи станиц через старые тракты, проложенные задолго до основания этих поселений. Также в этой связи стоит отметить и прокладку торговых маршрутов именно по реке Дон. Этот способ был наиболее выгоден с экономической точки зрения, а также он открывал для станицы новые возможности развития (например, прибытие иностранных специалистов).



Рис. 6. Базовые принципы формирования станицы Старочеркасской, связанные с включением прибрежной территории в структуру поселения. Схема автора

Заключение. В заключение хочется сказать, что современное состояние прибрежной территории станицы Старочеркасской является следствием вышеупомянутых событий. На сегодняшний день в станице помимо жилой функции реализуются в основном туристическая и досуговая функции (сезонные фестивали казачьей культуры). И прибрежная территория утратила свою значимость, вследствие функционального дефицита, вызванного отсутствием логистических связей по водной артерии – реке Дон. При всем этом прибрежная территория станицы Старочеркасской не утратила свой колоссальный пространственный, архитектурно-композиционный и ландшафтно-градостроительный потенциал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

2. Есаулов Г.В. Архитектура Юга России: от истории к современности. Очерки. Монография. М.: «Архитектура-С», 2016. 568 с.
3. Астапенко Е.М. История города Черкаска – станицы Старочеркасской XVI – начала XXI в. Ростов н/Д: ЗАО «Книга», 2016. 480 с.
4. Ригельман А.И. История о донских казаках. Ростов н/Д: Кн. изд-во, 1992. 224 с.

5. Сухоруков В.Д. Историческое описание земли Войска Донского. Ростов н/Д: Кн. изд-во, 2001. 514 с.

6. Строкова В.В., Пронштейн А.П. Земля Донская в XVIII веке. Ростов н/Д: РГУ, 1961. 375 с.

7. Броневский В. История Донского Войска, описание Донской земли и Кавказских минеральных вод. Ч. 1. СПб.: Тип. Экспедиции заготовления Государственных бумаг, 1834. 30 с.

8. Витков З.А. К вопросу о местоположении нижнедонских казачьих городков и их культура // Ученые записки Мурманского государственного педагогического института. 1958 Т. 2. С. 151–178.

9. Рыблова М.А. Мужские сообщества донских казаков как социокультурный феномен XVI – первой трети XIX в. [Электронный ресурс]. URL: <https://cheloveknauka.com/muzhskie-soobshchestva-donskih-kazakov-kak-sotsiokulturnyy-fenomen-xvi-pervoy-treti-xix-v> (дата обращения: 22.11.21)

10. Бочарова Е.О. Взаимодействие региональных традиций в архитектуре казачьих поселений (XVI – нач. XX века) [Электронный ресурс]. URL:

<http://www.dslib.net/restavracja/osvoenie-tradicij-v-arhitekture-gdr.html> (дата обращения: 22.11.21)

11. Ласковский Ф. Материалы для истории инженерного искусства в России. Ч.1-3. СПб.: тип. Имп. Акад. Наук, 1858-1865. 642 с.

12. Потапов И.П. Донские пути-дороги. Краеведческие записки. Вып. 3. Новочеркасск: НМИДК, 1998. 35 с.

13. Егоров-Хопреский В.И. Сокровища «Старого города». Ростов н/Д: Кн. изд-во, 1968. 105 с.

14. Краснянский М.Б. Исторический очерк Ростова и Нахичевани-на-Дону, по данным городского музея в г. Ростове-на-Дону. Ростов н/Д, 1914. 35 с.

15. Ильин А.М. История города Ростова-на-Дону. Очерк. М: Мини Тайп, 2020. 112 с.

16. Kazarov S. Nahichevan-on-Don: Armenian merchants and their role in the commercial development of the Azov – Black Sea region // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 399–429.

17. Samarina N. Rostov-on-Don: in the second half of the 19th – early 20th century: Dynamics and specificities of the socio-economic development // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 369–399.

18. Abdullayeva M. The rural population of Don's hinterland as a factor of the economic life of Rostov, end of the 19th century // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 329–369.

19. Tagirova N. The Volga-Don Road to the Black Sea: evolution and reality of the 19th century // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 33–61.

20. Konstantinova V., Lyman I. From the Azov to Batoum: evolution of the port-cities in the Russian frontier land // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 61–105.

21. Harlafits G. Black Sea Maritime and Economic History. The integration of the port-cities to the global economy // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 3–33.

22. Sifneos E., Harlafits G. Taganrog: Greek entrepreneurship in the Russian frontier of international trade // Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. №3. Pp. 191–235.

Информация об авторах

Бергман Анастасия Владимировна, аспирант кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: Anastasiabergman2018@gmail.com. Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-строительный Университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 23.11.2021 г.

© Бергман А.В., 2022

Bergman A.V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: Anastasiabergman2018@gmail.com

HISTORICAL ASPECTS OF FORMATION OF THE COASTAL AREA OF STANITSA STAROCHERKASSKAYA (COSSACK VILLAGE) IN THE ROSTOV REGION

Abstract. The article analyzes the formation of a Cossack village on the coastal territory of the Don River in a historical and architectural-compositional context. A retrospective of the formation of the Cossack village of stanitsa Starocherkasskaya from the 18th century is considered until now. The author focuses on both architectural and compositional aspects and historical background that influence the formation of the image of the Cossack village. In addition, the main social aspects that influenced the integration of the coastal area into the structure of a small historical settlement are identified. For the coastal area of the Starocherkasskaya Cossack village (stanitsa), the author identifies three key periods of formation and integration into the structure of the settlement. The first is the period during the 18th century. The second is the period from the 19th to the middle of 20th century. The third is the period from the second half of the 20th century to the present. Each period is considered in detail. This is of great importance in the formation of the Starocherkasskaya Cossack village (stanitsa), and in particular the coastal area as the most important component in the structure of the settlement. Five basic principles for the formation of the structure of the Cossack settlement are formulated and the role of the coastal territory in this process is indicated on the basis of analysis of historical cartographic

material.

Keywords: *stanitsa Starocherkasskaya (Cossack village Starocherkasskaya), architectural and compositional context, stages of settlement formation, coastal territory, Don River, Cossack villages (stanitsa).*

REFERENCES

1. Esaulov G.V. Architecture of Russian South. From the history to contemporary. [Arhitektura YUGA Rossii: ot istorii k sovremennosti. Ocherki. Monografiya]. Moscow: «Arhitektura-S», 2016. 568 p. (rus)
2. Astapenko E.M. History of the city of Cherkassk - the village of Starocherkasskaya XVI - early XXI century [Istoriya goroda Cherkasska – stanicy Starocherkasskoj XVI – nachala XXI v.] Rostov n/D: ZAO «Kniga», 2016. 480 p. (rus)
3. Rigel'man A.I. The story of the Don Cossacks. [Istoriya o donskih kazakah]. Rostov n/D: Kn. izd-vo, 1992. 224 p.
4. Suhorukov V.D. Historical description of the Don Army Land. [Istoricheskoe opisanie zemli Vojska Donskogo]. Rostov n/D: Kn. izd-vo, 2001. 514 p. (rus)
5. Strokova V.V., Pronshitejn A.P. Don land in the 18th century. [Zemlya Donskaya v XVIII veke]. Rostov n/D: RGU, 1961. 375 p. (rus)
6. Bronevskij V. History of the Don Host, description of the Don land and Caucasian mineral waters. [Istoriya Donskogo Vojska, opisanie Donskoj zemli i Kavkazskih mineral'nyh vod.] P. 1. SPb.: Tip. Ekspedicii zagotovleniya Gosudarstvennyh bumag, 1834. 30 p. (rus)
7. Vitkov Z.A. To the question of the location of the Lower Don Cossack townships and their culture [K voprosu o mestopolozenii nizhnedonskih kazach'ih gorodkov i ih kul'tura]. Scientific notes of the Murmansk State Pedagogical Institute. 1958. Vol. 2. Pp. 151–178. (rus)
8. Ryblova M.A. Male communities of the Don Cossacks as a socio-cultural phenomenon of the 16th - first third of the 19th centuries. [Muzhskie soobshchestva donskih kazakov kak sociokul'turnyj fenomen XVI - pervoj treti XIX v.]. URL: <https://che-loveknauka.com/muzhskie-soobshchestva-donskih-kazakov-kak-sotsiokulturnyy-fenomen-xvi-pervoy-treti-xix-v> (date of treatment: 22.11.21)
9. Bocharova E.O. Interaction of regional traditions in the architecture of Cossack settlements (XVI - early XX century) [Vzaimodejstvie regional'nyh tradicij v arhitekture kazach'ih poselenij (XVI – nach. XX veka)]. URL: <http://www.dslib.net/restavracja/osvoenie-tradicij-v-arhitekture-gdr.html> (date of treatment: 22.11.21)
10. Laskovskij F. Materials for the history of engineering in Russia. [Materialy dlya istorii inzhernogo iskusstva v Rossii]. CH.1-3. SPb.: tip. Imp. Akad. Nauk, 1858-1865. 642 p. (rus)
11. Potapov I.P. Don ways-roads. Local history notes. [Donskie puti-dorogi. Kraevedcheskie zapiski]. Vol. 3. Novocherkassk: NMIDK, 1998. 35 p. (rus)
12. Egorov-Hopreskij V.I. Treasures of the "Old City". [Sokrovishcha «Starogo goroda»]. Rostov n/D: Kn. izd-vo, 1968. 105 p. (rus)
13. Krasnyanskij M.B. Historical sketch of Rostov and Nakhichesvan-on-Don, according to the city museum in Rostov-on-Don. [Istoricheskij ocherk Rostova i Nahichesvani-na-Donu, po dannym gorodskogo muzeya v g. Rostove-na-Donu]. Rostov n/D, 1914. 35 p. (rus)
14. Il'in A.M. History of the city of Rostov-on-Don. Feature article. [Istoriya goroda Rostova-na-Donu. Ocherk]. M: Mini Tajp, 2020. 112 p. (rus)
15. Kazarov S. Nahichevan-on-Don: Armenian merchants and their role in the commercial development of the Azov – Black Sea region. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 399–429.
16. Samarina N. Rostov-on-Don: in the second half of the 19th – early 20th century: Dynamics and specificities of the socio-economic development. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No.3. Pp. 369–399.
17. Abdullayeva M. The rural population of Don's hinterland as a factor of the economic life of Rostov, end of the 19th century. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 329–369.
18. Tagirova N. The Volga-Don Road to the Black Sea: evolution and reality of the 19th century. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 33–61.
19. Konstantinova V., Lyman I. From the Azov to Batoum: evolution of the port-cities in the Russian frontier land. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 61–105.
20. Harlafits G. Black Sea Maritime and Economic History. The integration of the port-cities to the global economy. Black Sea History Working Papers. Centre of Maritime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 3–33.

21. Sifneos E., Harlafits G. Taganrog: Greek entrepreneurship in the Russian frontier of international trade. Black Sea History Working Papers. Centre of

Martime History, Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology. Rethymnon, Crete. 2020. No. 3. Pp. 191–235.

Information about the authors

Bergman, Anastasia V. Postgraduate student. E-mail: Anastasiabergman2018@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st.

Received 23.11.2021

Для цитирования:

Бергман А.В. Исторические аспекты формирования прибрежной территории станицы Старочеркасской в Ростовской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 50–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-50-59

For citation:

Bergman A.V. Historical aspects of formation of the coastal area of stanitsa starocherkasskaya (Cossack village) in the rostov region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 50–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-50-59

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-60-70

Воронина О.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: olgavoronina4@gmail.com

КАРТОГРАФИЯ СИБИРИ XVII–XX В.: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И МЕТОДИКА РАБОТЫ С КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Аннотация. Картографические источники - карты, планы, схемы, чертежи и т.п., заслуженно являются отправной точкой в исторических, социально-экономических, этнографических, архитектурно-градостроительных и др. исследованиях. Тем не менее, на настоящем момент времени нет общего понимания качественного состава этого объемного блока информации, а также отсутствует единый подход к интерпретации исторической картографии. В статье представлена методика «послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур», которая позволяет получить классификацию исторических планов, уверенно выделив среди них, фиксационные, проектные и директивные планы. Согласно представленной методике сложившаяся планировочная структура исследуемого населенного пункта, легко доступная в виде оцифрованных спутниковых снимков, является основой для графического анализа исторического плана, а каждый из исследуемых картографических источников, будь то план или пояснительная записка к нему, рассматривается в контексте непрерывного процесса архитектурно-планировочного развития населенного пункта в частности и государства в целом.

Представленная методика была успешно апробирована в рамках работы над проектом границ территории и предмета охраны исторического поселения федерального значения «Город Томск».

Ключевые слова: историческая картография, генеральный план города, архитектурно-планировочное развитие, директивный план, методика послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур, историческая информатика.

Введение. Актуальность выработки методов и подходов в работе с исторической картографией обусловлена ее основополагающей ролью в качестве формирования базового исследовательского материала. Разновременные чертежи, карты и планы используются учеными в качестве доказательной базы выдвигаемых гипотез, обосновании социально-политических, экономических и др. процессов, происходивших в истории развития обществ и государств. В настоящее время планы городов XVI–XX вв. являются основой для формирования границ исторических поселений. В соответствии с Федеральным законом "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации" от 25.06.2002 N 73-ФЗ объектами культурного наследия являются фрагменты исторических планировок и застроек поселений, которые могут быть отнесены к градостроительным ансамблям [1]. Города и поселения, имеющие древнюю самобытную историю, могут попасть в список охраняемых государством объектов при наличии четкой доказательной базы, построенной на основании наличия исторических планировочных документов, «привязанных» к современной геоинформационной системе (ГИС).

Современные исследователи принимают этот вызов и активно вырабатывают комплексные предложения по формированию научных подходов работы с исторической картографией в

геоинформационной системе. Можно выделить направление исторической информатики и труды одного из ведущих ученых этого направления Владимирова В.Н. «Историческая геоинформатика: геоинформационные системы в исторических исследованиях», где он рассматривает возможности компьютерного картографирования в процессе изучения истории населенных пунктов Алтайского края в XVIII–XX вв. и другие его работы [2, 3]. Историки Баталов Р.Н., Радченко Л.К. и Валетов Т.Я. выполнили обзор основных направлений использования ГИС-технологий в историко-картографических исследованиях [4, 5, 6, 7]. О необходимости сохранения культурного ландшафта пишет и Веденин Ю.А., выделяя его важным аспектом, подчеркивающим индивидуальность населенного пункта [8]. Использовать в качестве основы, выявленные ценные планировочные элементы исторической среды для формирования потенциальных пространственных каркасов, предлагает Гельфонд А.Л. Необходимость в этом она обосновывает потребностью развития структуры доминант исторических городов и поселений [9]. Оптимизации работы с историческими планами посвящено исследование Гришина Е.С., который предлагает создать единый фонд историко-картографических материалов [10]. Активная работа по цифровизации исторических планов населенных пунктов Ленинградской области ведут Семенцов С.В. и Акулова

Н.А. [11, 12]. В политической экономике и экономической географии историческая картография занимает важное место, являясь одним из основных источников, что подчеркивают, как отечественные, так и зарубежные ученые [13, 14, 15].

На основании вышеизложенного можно констатировать, что в последние годы к проработке данной тематики привлечены специалисты из разных областей наук, что доказывает востребованность исторических карт как источника информации и подчеркивает необходимость выработки методов и подходов работы с исторической картографией, которые позволили бы получать достоверную и актуализированную информацию.

Материалы и методы. Отработка методики проведена на материалах центральных и местных архивов: Российского государственного исторического архива (РГИА), Российского государственного военно-исторического архива (РГВИА), Государственного архива Томской области (ГАТО), Центра документации новейшей истории Томской области (ЦДНИТО), Государственного архива Новосибирской области (ГАНО).

В качестве основы подхода использован общенаучный принцип историзма, который позволил рассмотреть картографические источники в контексте эволюции временных и пространственных границ. Формирование методики «послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур» стало возможным на основе применения основных положений историко-сравнительного метода, который позволил определить особенности картографических материалов, относящихся к разным историческим периодам. Историко-системный метод позволил рассмотреть исторические планы с точки зрения совокупности факторов, повлиявших на эволюцию архитектурно-планировочного развития города.

Принцип объективности применён для сравнения и сопоставления данных, зафиксированных в средневековой картографии Сибири XVII в. Также был использован метод архитектурно-реставрационного анализа, включающего в себя выполнение реконструкции исторических планов и систематизацию архивных документов, чертежей, старинных фотографий и статистических сведений.

Особое внимание уделено законодательной базе: указы Полного собрания законов Российской империи, документы Посольского приказа, статьи Строительного устава, относящиеся к Сибири, и прочие документы государственного уровня.

Основная часть. Методика «послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур» была разработана и применена в рамках работы Ворониной О.С. над диссертационным исследованием «Развитие планировочной структуры города Томска XVII – XX вв.». В данной статье описаны основные этапы работы с историческими графическими планами.

Картографические источники изначально и до начала XXI в. являются официальными документами, с регламентированием подписи, которая имеет устойчивую структуру и состоит из трех обязательных элементов. Первый элемент – это название, которое сообщает, к какому типу чертежей относится план к фиксационному, проектному или директивному. Вторым элементом является указание на административно-территориальный статус населенного пункта и его наименование. Уездный город N, Губернский город N или населенный пункт другого статуса. Третий элемент – информация о масштабе. Подпись картографического источника является его условным кодом, под которым он вписывался в процесс градостроительной деятельности.

Методика «послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур» состоит из двух частей – информационной и графоаналитической.

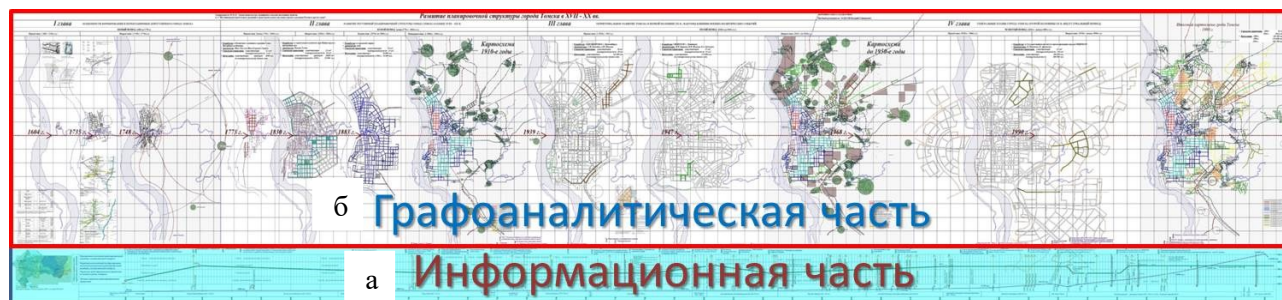


Рис. 1. Методика послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур
а) информационная часть б) графоаналитическая часть

Графоаналитическая часть. Для исследования важно определить роль и значение исторического плана в процессе архитектурно-планировочного развития населенного пункта. Рассмотрим схему процесса градостроительного развития абстрактного населенного пункта через призму развития градостроительной и проектной деятельности. Введем понятие: «Директивного плана» и применим его к разновременным историческим планам, прошедшим утверждение на государственном уровне, которые назывались в XVIII – XIX вв. – Высочайше утвержденными планами урегулирования города, в XX в. – Генеральными планами города.

Для создания яркой модели графоаналитической части метода, приведем предварительные теоретические выкладки и сделаем некоторые упрощения.

Начнем рассматривать процесс градостроительного развития условного города N с самого начала образования государства. Предположим, что в какой-то момент времени в управлении государством возникла потребность объединить все населенные пункты в единую административно-

территориальную систему. Государственная политика в один момент выделила отдельные населенные пункты, и они стали называться городами. В городах была сосредоточена административно-территориальная власть, которая распространялась на закрепленные за ними земли.

Выделение городов с высокими полномочиями (статусами) сделало возможным концентрацию на их территориях транзитных потоков, которые ранее были рассредоточены по обширным территориям. Следствием этой градостроительной политики государства стал территориальный рост новых городов, планировочная структура которых развивалась в соответствии с дорегулярными принципами. В начале XVIII в. правительством была инициирована деятельность по урегулированию городской застройки на государственном уровне, соответственно, в этот период были составлены первые планы городов.

Далее необходимо рассмотреть обобщенную схему процесса регламентированного развития территории города, который представлен на рисунке 2.

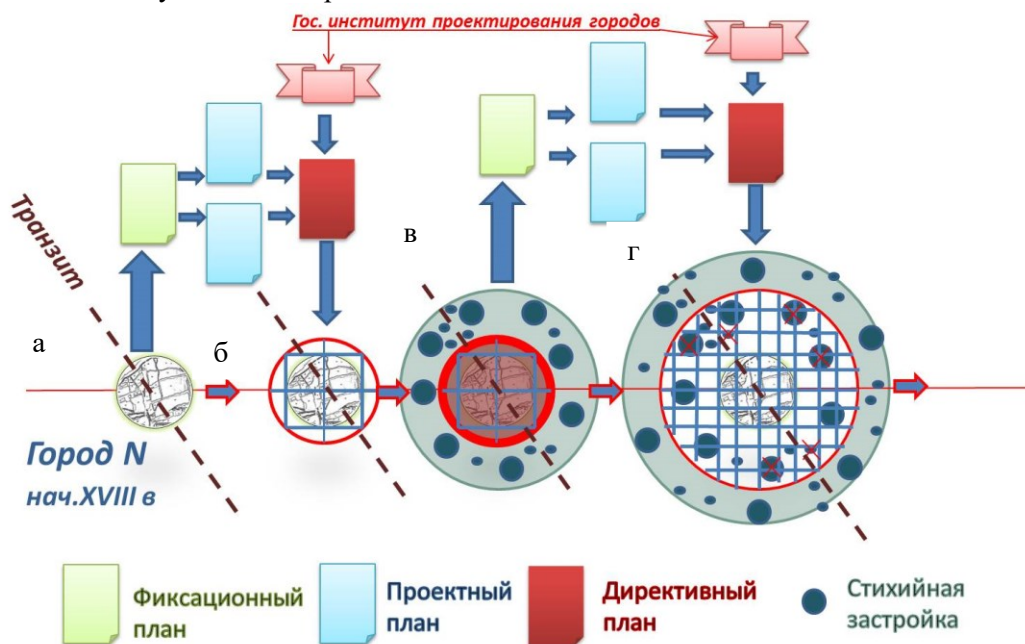


Рис. 2. Обобщенная схема процесса регламентированного развития планировочной структуры города N
а) фиксация сложившейся планировочной структуры города, б) разработка и утверждение директивного плана города, в) формирование пояса периферийной/стихийной застройки, г) разработка и утверждение нового директивного плана города, и формирование следующего пояса периферийной/стихийной застройки

Обозначим территорию Города N, который имеет площадь не более двух квадратных километров, дорегулярную планировочную структуру и интенсивный транзитный поток. Город N находится в преддверии процесса урегулирования планировочной структуры.

Для того чтобы процесс урегулирования планировочной структуры города был начат,

необходимо сделать его фиксацию, а значит, появился первый фиксационный план, составленный на месте городским или присланным геодезистом (рис. 2, а). К фиксационному плану было положено составить подробную экспликацию, дать пояснения, проектные предложения и направить в специальную государственную службу, которую условно можно называть – гос-

ударственным институтом проектирования городов. В данной службе на основе предоставленных с места материалов разрабатывается директивный план, решающий задачи по урегулированию городской застройки, организации схемы движения транзитных потоков и функционального зонирования городских территорий. Директивный план присылается в Город N для исполнения. С этого момента четко обозначается и фиксируется территориальная граница Города N, в черте которой запрещено вести самовольную застройку, противоречащую директивному плану (рис. 2, б).

Однако известно, что строгость законов нивелируется не обязательностью их исполнения, и если регламент застройки действовал в утвержденных границах Города N, то за его пределами правила установлены не были. Вся самовольная (стихийная) застройка сосредоточилась на периферии Города N сразу за границами, обозначенными в директивном плане. При этом, объекты стихийной застройки могли иметь как дорегулярную планировочную структуру, так и регулярную. Статус стихийной застройки присваивался территориям, которые застраивались без согласования с актуальным директивным планом.

Интенсивное строительство в черте города способствовало процессам активизации стихийной застройки, которая формировала условный пояс периферийной застройки (рис. 2, в). В какой-то момент утвержденные границы становятся тесны, и требуется очередной виток в развитии городской застройки, соответственно, необходимо разрабатывать и утверждать новый директивный план.

Однако резервных территорий за чертой Города N нет, так как к этому моменту пояс периферийной – стихийной застройки уже смыкается. Процесс по разработке нового директивного плана начинался заново. Сначала необходимо было сделать фиксацию сложившейся градостроительной ситуации и составление нового фиксационного плана на всю территорию Города N, которая была необходима для перспективного развития территорий, включая пояс стихийной застройки.

Фиксационный план с пояснениями и проектными предложениями местных специалистов, направляется в государственный институт проектирования городов. На основе присланных с места материалов разрабатывался новый директивный план, который часть стихийной застройки узаконивал, а часть незаконно возведенной застройки предписывал снести. И снова Город N имеет утвержденные границы, вся деятельности специалистов в области градостроительства и архитектуры сосредоточена внутри утвержденных

директивным планом городских границ, а за границей формируется новое кольцо стихийной застройки (рис. 2, г). И так, по аналогии с годовыми кольцами на срезе дерева растет территория Города, растет количество циклов, а с ними и количество картографических источников.

Уже в XX веке появляется новый тип картографических источников – проект детальной планировки, который разрабатывается в контексте директивного плана и его назначение – уточнение, детализация планировки отдельного района, комплекса, квартала.

Таким образом, в общих чертах видно из чего состоит массив картографических источников: директивные планы, фиксационные планы, проектные планы, разработанные местными специалистами, проекты детальной планировки. Мы рассмотрели общую схему функционирования процесса градостроительной деятельности, выявили типологию картографических источников и получили рабочую модель Города N.

Переходим к подробному рассмотрению графоаналитической части методики послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур, состоящей из IX этапов которые в совокупности представлены на рисунке 1.

I этап. Сбор картографических материалов. Градостроительная деятельность имеет четко обозначенные циклы от директивного плана до директивного плана. Каждый цикл обеспечен проектной деятельностью. Соответственно, необходимо собрать максимально полную коллекцию картографических источников, которая обеспечит качественные результаты исследования.

II этап. Получение актуального спутникового снимка населенного пункта с хорошим разрешением, который станет подосновой графоаналитического исследования.

III этап. В доступном графическом редакторе создаем масштабную сетку, которая необходима для ориентирования в созданном графическом поле и позволит наглядно фиксировать пространственное развитие архитектурно-планировочной структуры в сопоставимых величинах.

IV этап. Выделяем точку - центр пересечения условных осей «север-юг», «запад-восток». Ось запад-восток совмещаем с временной шкалой. Этот ориентир позволит единообразно привязывать все проекции относительно сторон света.

V этап. Определяем статус каждого исторического плана – директивный, проектный или фиксационный.

VI этап. Делаем графическую реконструкцию исторических планов и приводим их к одному масштабу. Это самый трудоемкий этап, ко-

торый требует крайней внимательности, последовательности и тщательности исполнения. На рисунке 3 приведен пример реконструкции фиксационного плана города Томска 1767 года.

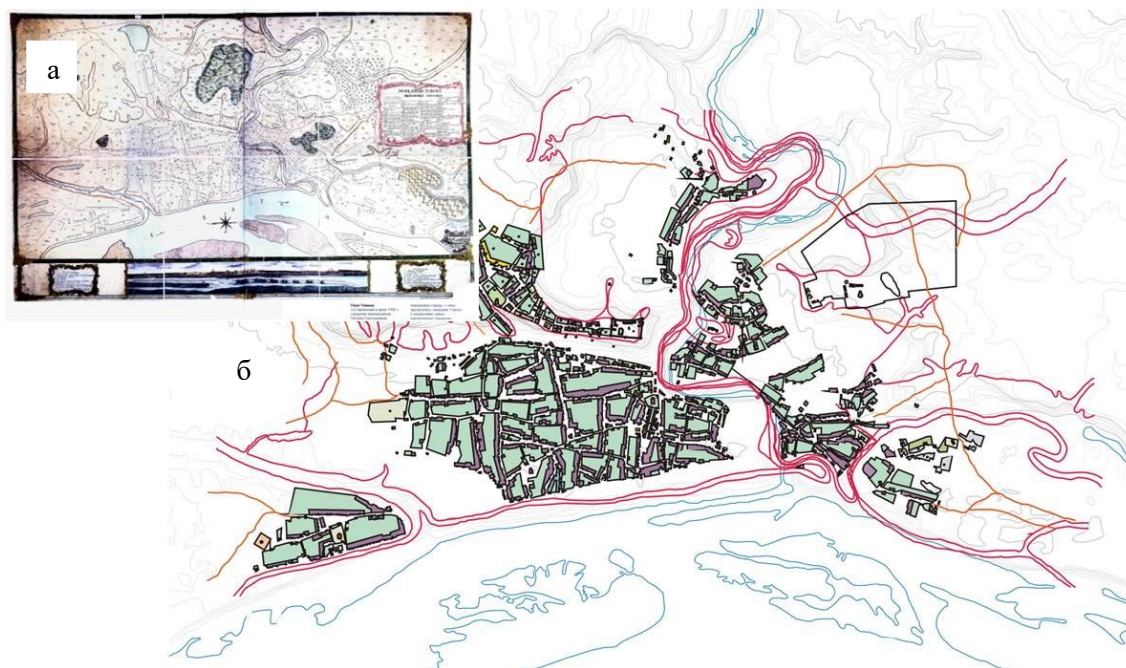


Рис. 3. Пример. Графическая реконструкция плана 1767 г.
а) оригинал б) реконструкция

VII этап. Каждому плану присваивается свой цвет – маркер, которым он будет обозначен в итоговой картосхеме. Пример приведен на рисунке 4.

VIII этап. Послойное наложение. Это ключевой этап методики, который выполняется после-

довательно, на основе спутниковой карты населенного пункта начиная с первого исторического плана и заканчивая последним по времени планом коллекции исследователя. Результат реализации методики на примере Томска представлен на рисунке 5.



Рис. 4. Пример, присвоения цветовых маркеров историческим планам

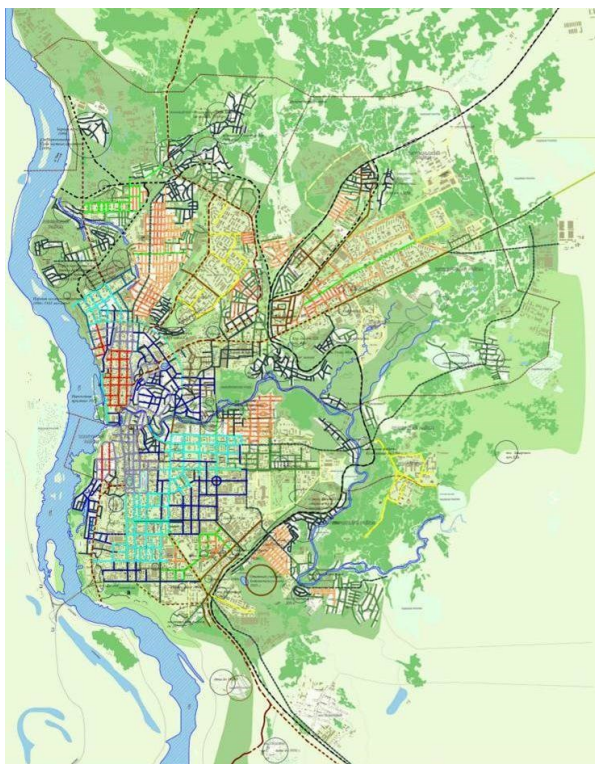


Рис. 5. Картохема развития планировочной структуры города Томска XVII–XX в., полученная на основе методики послойного наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур

IX этап. Определение частей планировочной структуры, подходящей под параметры стихийной застройки, то есть застройки изначально не согласованной с директивным планом. Именно этот тип застройки представляет особый исследовательский потенциал, отсылающий к процессам взаимодействия местных специалистов, с

государственным аппаратом, регулирующим градостроительную деятельность в стране. В Томске масштаб стихийной застройки можно проиллюстрировать одним из графических выводов данной методики, представленным на рисунке 6.

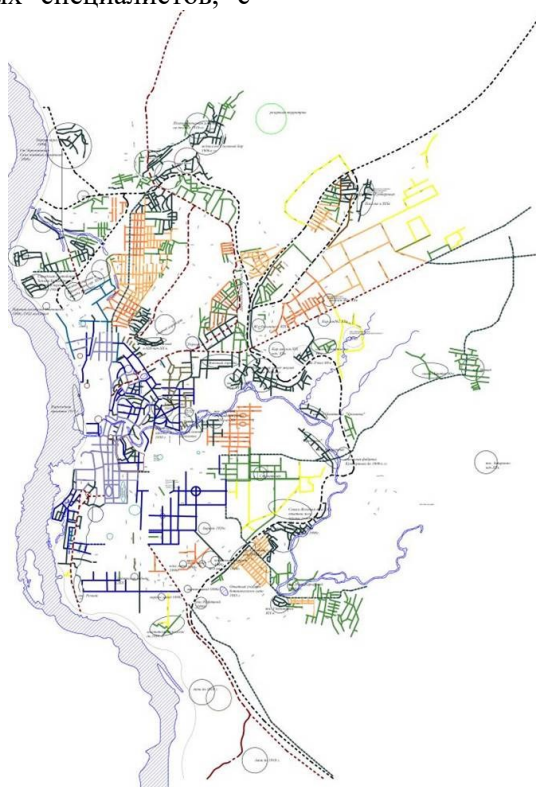


Рис. 6. Картохема с фиксацией разновременной стихийной застройки города Томска сформировавшейся в XVII – XX в.

Стихийная застройка обращает внимание исследователя на исторические процессы законодательской градостроительной деятельности проводимой в государстве на разных исторических этапах, на выявление которых направлена вторая, информационная часть методики.

Информационная часть методики представляет собой таблицу, которая в хронологическом порядке систематизирует данные о градостроительной политике, строительной деятельности, реформах государства на разных этапах его развития.



Рис. 7. Первый слой данных вносимых в информационную таблицу

Вся информация, вносимая в таблицу, размещается в хронологическом порядке. Временная шкала – одно деление соответствует календарному году. Основное поле информационной таблицы разделено на четыре части, которые сопоставлены с четырьмя уровнями системы административно-территориального деления. В это поле вносятся данные о проводимых в государстве реформах административно-территориального деления. Четыре уровня, это условное и принятое

ограничение при моделировании градостроительных процессов. В верхней части таблицы размещены данные об основных законодательных актах в сфере градостроительной политики государства (рис. 7).

Второй слой информационной составляют данные, относящиеся непосредственно к населенному пункту, для которого был разработан исторический план (рис. 8).



Рис. 8. Второй слой данных вносимых в информационную таблицу

Шкала численности населения для города Томска была принята исходя из данных переписи населения конца XX в. Для Томска это значение близко к полумиллиону жителей.

В качестве примера заполнения информационной таблицы, приведем данные относительно изменения административно-территориального статуса и положения Томска в этой структуре.

На начало XVII в. структуру административно-территориального деления России можно

описать следующим образом: Власть сосредоточена в городе, имеющем статус столичного. Территория страны разделена на разряды с выделением города – центра Разряда. Территория Разряда делилась на уезды. Уезды – на города, волости, заимки, юрты, деревни и другие мелкие административно-территориальные единицы.

Изменения структуры административно-территориального деления произошли в 1708 г.,

Томске активизировалась работа по трансформации дорегулярной планировочной структуры в соответствии с директивным планом 1773 г. Понижение административно-территориального статуса способствует стагнации градостроительной деятельности.

Методика «последнего наложения и анализа разновременных проекций планировочных структур» была разработана и применена Ворониной О.С. в рамках работы над диссертационным исследованием «Развитие планировочной структуры города Томска XVII–XX вв.».

Результаты применения методики к разновременным планам города Томска были использованы в работе над проектом границ территории и предмета охраны исторического поселения федерального значения «Город Томск». В составе проектной документации выделен раздел – «Выявление закономерностей формирования планировочной структуры исторического поселения на разных исторических этапах» [17].

Также с помощью представленного инструмента доказана гипотеза о наличии полноценной реализации в Томске градостроительного проекта по типу «города-сада», который на сегодняшний день представляет собой уникальный сохранившийся исторический опыт в отечественной градостроительной практике [18].

Выводы

3. Картографические источники обладают значительным исследовательским потенциалом и в полной мере дают возможность делать объемное прочтение процесса развития архитектурно-планировочной структуры исследуемого населенного пункта в контексте социально-экономических и политических процессов.

4. Представленная методика работы с картографической информацией раскрывает специфику картографических источников и каждого этапа в процессе развития проектной и градостроительной деятельности. Методика позволяет аргументированно классифицировать исторические планы по трем типам: фиксационные, проектные и директивные.

Источник финансирования. Грант № ГСГК-11/20 «Стипендиальной программы Владимира Потанина» в номинации «Новый учебный онлайн-курс». Курс «Современные методы и подходы к анализу источников по истории Сибири XVII – начала XXI в.».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002 N 73-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // Информационно-правовой

портал «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/ (дата обращения 11.02.2022).

2. Владимиров В.Н. Геоинформационные технологии в исторических исследованиях // Новая и новейшая история. 2006. №. 3. С. 133–141.

3. Владимиров В.Н. Историческая геоинформатика: геоинформационные системы в исторических исследованиях. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2005. 192 с.

4. Баталов Р.Н., Радченко Л.К. Обзор основных направлений использования ГИС-технологий в историко-картографических исследованиях // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. №. 1. С. 119–135. doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-119-135

5. Валетов Т.Я. Применение открытых картографических сервисов (Google, Яндекс, OSM) при создании исторических ГИС: разработка цифровой карты Транссибирской магистрали // Историческая информатика. 2021. №. 3. С. 19–37. doi: 10.7256/2585-7797-2021.3.36547

6. Wilson A. Sydney Timemap: Integrating Historical Resources Using GIS // History and Computing, 2001. Vol. 13. № 1. P. 45–69.

7. Rumsey D., Williams M. Historical maps in GIS. Past Time, Past Place: GIS for History. ESRI. 2002. Pp. 1–18.

8. Веденин Ю.А. Культурный ландшафт как объект наследия [Электронный ресурс] // Сайт «Хранители наследия». URL: <http://hraniteli-nasledia.com> 23.08.2017 (дата обращения 20.01.2020).

9. Гельфонд А.Л. Концепция формирования потенциальных пространственных каркасов исторических поселений // Academia. Архитектура и строительство. 2019. №. 1. С. 26–34. doi: 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34

10. Гришин Е.С. Фонд историко-картографических материалов как средство унификации исторических ГИС и цифровой картографии // Историческая информатика. 2019. №. 1. С. 133–142. doi: 10.7256/2585-7797.2019.1.29260

11. Семенцов С.В., Акулова Н.А. Формирование Санкт-Петербургской агломерации в XVIII веке // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. 2018. №. 11. С. 61–75. doi: 10.12737/article_5bf7e355cd3de1.12294639

12. Sementsov S.V., Akulova N.A. Development of the st. Petersburg agglomeration in the XIX–early XX century // Urban construction and architecture. 2019. Т. 9. №. 2. С. 118–127. doi: 10.17673/Vestnik.2019.02.16.

13. Rowney Don K. Geographic Information Systems as a Tool in the Study of Politycal Economy: State, Economy and Regional Policy in Russia

at the Turn of the Century // Data Modelling. Modelling History. Moscow, 2000. Pp. 124–147.

14. Анимица Е.Г. Стратегическое планирование развития территории: сущность, основные принципы, проблемы // Journal of new economy. 2005. №. 12. С. 87–95.

15. Силин Я.П., Анимица Е.Г., Новикова Н.В. Перед вызовами третьей волны индустриализации: страна, регион // Journal of new economy. 2016. №. 3 (65). С. 14–25

16. Воронина Ольга Салаватовна [Электронный ресурс]: личная страница соискателя //

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Электрон. дан. [Б. м.], 2012–2020. URL: <http://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/voronina-olga-salavatovna> (дата обращения: 12.03.2021).

17. Проект границ территории и предмета охраны исторического поселения федерального значения «Город Томск» разработчик ФГУП ЦНРИМ, М., 2016, контракт № НИР-01.

18. Залесов В. Г., Воронина О. С., Кожуркова Т. Б. Город-сад в Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. №. 4 (51). С. 22–35.

Информация об авторах

Воронина Ольга Салаватовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры лесного хозяйства и ландшафтного строительства. E-mail: olgavoronina4@gmail.com Национальный исследовательский Томский государственный университет. Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

Поступила 14.02.2022 г.

© Воронина О.С., 2022

Voronina O.S.

National Research Tomsk State University

E-mail: olgavoronina4@gmail.com

CARTOGRAPHY OF SIBERIA OF THE XVII -XX CENTURIES: RESEARCH POTENTIAL AND METHODS OF WORKING WITH CARTOGRAPHIC INFORMATION

Abstract. Cartographic sources - maps, plans, diagrams, and drawings are deservedly the starting point in historical, socio-economic, ethnographic, architectural and urban planning studies. However, there is no general understanding of the qualitative composition of this voluminous block of information. Moreover, there is no unified approach to the interpretation of historical cartography. The article presents the technique of "layering and analysis of multi-temporal projections of planning structures". This allows to get a classification of historical plans, highlighting fixing, design and directive plans. According to the presented methodology, the existing planning structure of the studied settlement is easily accessible in the form of digitized satellite images and is the basis for graphical analysis of the historical plan. Each of the studied cartographic sources, whether it is a plan or an explanatory note, is considered in the context of the continuous process of architectural and planning development of the settlement and the state. The presented methodology is successfully tested as part of the work on the project of the boundaries of the territory and the subject of protection of the historical settlement of federal significance "Tomsk City".

Keywords: historical cartography, city master plan, architectural and planning development, directive plan, method of layering and analysis of multi-temporal projections of planning structures.

REFERENCES

1. Federal Law "On objects of cultural heritage (monuments of history and culture) of the peoples of the Russian Federation" dated June 25, 2002 N 73-FZ [Federal'nyj zakon «Ob ob`ektax kul'turnogo naslediya (pamyatnikax istorii i kul'tury») narodov Rossijskoj Federacii» ot 25.06.2002 No. 73-FZ (poslednyaya redakciya)]. Informacionno-pravovoj portal «Konsul'tantPlyus». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/ (data of treatment: 11.02.2022). (rus)

2. Vladimirov V.N. Geoinformation technologies in historical research [Geoinformacionnye

tekhnologii v istoricheskikh issledovaniyah]. New and recent history. 2006. No. 3. Pp. 133–141. (rus)

3. Vladimirov V.N. Historical geoinformatics: geoinformation systems in historical research [Istoricheskaya geoinformatika: geoinformacionnye sistemy v istoricheskikh issledovaniyah]. Barnaul: Alt. un-ta, 2005. 192 p. (rus)

4. Batalov R.N., Radchenko L.K. Overview of the main directions of using GIS technologies in historical and cartographic research [Obzor osnovnyh napravlenij ispol'zovaniya GIS-tekhnologii v istoriko-kartograficheskikh issledovaniyah]. Vestnik

SSUGT. 2020. Vol. 25. No. 1. Pp. 119–135. (rus) doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-119-135

5. Valetov T.Ya. Open map services (Google, Yandex, and offline OSM) when creating historical GIS: the development of a digital map of the TRANS-Siberian railway. [Primenenie otkrytyh kartograficheskikh servisov (Google, YAndeks, OSM) pri sozdanii istoricheskikh GIS: razrabotka cifrovoj karty Transsibirskoy magistrali]. Istoricheskaya informatika. 2021. No. 3. Pp. 19–37. (rus) doi: 10.7256/2585-7797-2021.3.36547

6. Wilson A. Sydney Timemap: Integrating Historical Resources Using GIS. History and Computing, 2001. Vol. 13. No. 1. Pp. 45–69.

7. Rumsey D., Williams M. Historical maps in GIS. 2002. ESRI .Past Time, Past Place: GIS for History. Pp. 1–18.

8. Vedenin YU.A. Cultural landscape as a heritage object [Kul'turnyj landschaft kak ob"ekt naslediya. URL: <http://hraniteli-nasledia.com> 23.08.2017 (data of treatment: 20.01.2020). (rus)

9. Gel'fond A.L. The concept of the formation of potential spatial frameworks of historical settlements [Konceptiya formirovaniya potencial'nyh prostranstvennykh karkasov istoricheskikh poselenij. Academia. Architecture and construction]. 2019. No. 1. Pp. 26–34. (rus) doi: 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34

10. Grishin E.S. Fund of Historical and Cartographic Materials as a means of unification of historical GIS and digital cartography [Fond istoriko-kartograficheskikh materialov kak sredstvo unifikatsii istoricheskikh GIS i cifrovoj kartografii]. Historical informatics. 2019. No 1. Pp. 133–142. (rus) doi: 10.7256/2585-7797.2019.1.29260

11. Semencov S.V., Akulova N.A. Formation of the St. Petersburg agglomeration in the XVIII century. [Formirovanie Sankt-Peterburgskoy aglomeratsii v XVIII veke]. Bulletin of BSTU named after

V.G. Shukhov. 2018. No. 11. Pp. 61–75. (rus) doi: 10.12737/article_5bf7e355cd3de1.12294639

12. Sementsov S.V., Akulova N.A. Development of the st. Petersburg agglomeration in the XIX-early XX century. Urban construction and architecture. 2019. Vol. 9. No. 2. Pp. 118–127. doi: 10.17673/Vestnik.2019.02.16.

13. Rowney Don K. Geographic Information Systems as a Tool in the Study of Politycal Economy: State, Economy and Regional Policy in Russia at the Turn of the Century. Data Modelling. Modelling History. Moscow, 2000. Pp. 124–147.

14. Animica E.G. Strategic planning of territory development: essence, basic principles, problems. [Strategicheskoe planirovanie razvitiya territorii: sushchnost', osnovnye principy, problem]. Journal of new economy. 2005. No 12. Pp. 87–95. (rus)

15. Silin Ya.P., Animica E.G., Novikova N.V. Facing the challenges of the third wave of industrialization: country, region. [Pered vyzovami tret'ej volny industrializatsii: strana, region]. Journal of new economy. 2016. No. 3 (65). Pp. 14–25. (rus)

16. Voronina Ol'ga Salavatovna: personal page of the applicant. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Elektron. dan. [B. m.]. 2012–2020. URL: <http://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/voronina-olga-salavatovna> (data of treatment: 12.03.2021). (rus)

17. Project of the boundaries of the territory and the subject of protection of the historical settlement of federal significance "City of Tomsk" developer FSUE CRRDW [Proekt granic territorii i predmeta ohrany istoricheskogo poseleniya federal'nogo znacheniya «Gorod Tomsk» razrabotchik FGUP CNRPM], M., 2016, the kontrakt № RW-01. (rus)

18. Zalesov V.G., Voronina O.S., Kozhurkova T.B. Garden City in Tomsk [Gorod-sad v Tomske]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015. No 4 (51). Pp. 22–35. (rus)

Information about the authors

Voronina, Olga S. PhD, Assistant professor. E-mail: olgavoronina4@gmail.com. National Research Tomsk State University. Russia, 634050, Tomsk, Lenin Ave, 36

Received 14.02.2022

Для цитирования:

Воронина О.С. Картография Сибири XVII –XX в.: исследовательский потенциал и методика работы с картографической информацией // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 60–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-60-70

For citation:

Voronina O.S. Cartography of siberia of the XVII -XX centuries: research potential and methods of working with cartographic information. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 60–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-60-70

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-71-80

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ПРОДУКТА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ В КАЧЕСТВЕ МИНЕРАЛИЗАТОРА ПРИ ОБЖИГЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения техногенного продукта электролитического производства алюминия (электродного боя) в качестве минерализующей добавки при обжиге клинкера. Приводится сравнение эффективности действия минерализующего эффекта электродного боя и классического минерализатора – фторида кальция CaF_2 . Количество минерализаторов, вводимых при обжиге клинкера, составляло 1 % по содержанию фтор-иона в сырьевой смеси. Эффективность действия минерализаторов оценивалась по определению температурного интервала усвоения оксида кальция в клинкерные минералы. При введении в сырьевую смесь фторида кальция CaF_2 оксид кальция полностью усваивается к 1300 °С. Введение в сырьевую смесь электродного боя способствует полному усвоению оксида кальция к температуре 1250 °С. Для бездобавочного клинкера полное усвоение оксида кальция происходит при 1400 °С. Усвоение оксида кальция при более низких температурах в смесях с добавлением фторида кальция и электродного боя позволяет снизить температуру обжига клинкера до 1350 °С без потери качества получаемого клинкера. Снижение температуры обжига клинкера при использовании минерализаторов позволит сократить удельный расход условного топлива примерно на 6 кг на тонну клинкера.

Ключевые слова: электродный бой, минерализатор, замена фторида кальция, температура обжига клинкера, снижение затрат тепла.

Введение. Одним из самых важных и актуальных направлений развития цементной промышленности является снижение ресурсо- и энергозатрат на производство клинкера и, тем самым, себестоимости цемента. В настоящее время наибольшее значение приобретает проблема экономики природных топливно-энергетических ресурсов, решение которой необходимо осуществлять путем совершенствования наиболее энергоемкого передела производства – обжига клинкера. Все возможные способы и пути оптимизации данного процесса можно разделить на две группы – технические (повышение эффективности работы оборудования) и технологические (интенсификация физико-химических процессов).

При рассмотрении эффективных способов интенсификации физико-химических процессов, протекающих при обжиге клинкера, наиболее целесообразным представляется ввод различных минерализующих добавок. Минерализаторы, в небольших количествах введенные в сырьевую смесь, способны ускорять твердофазовые реакции, снижать температуру появления расплава и улучшать его свойства. Использование данных добавок особенно рационально для трудноспекаемых смесей по причине ограниченного количества плавней, повышенного содержания крупнокристаллических кварцевых включений или же

при увеличенных значениях коэффициента насыщения.

В качестве минерализаторов могут использоваться как природные минералы, так и продукты других отраслей промышленности, содержащие в себе соединения, ускоряющие процесс спекания клинкера и повышающие реакционную способность цементной сырьевой смеси [1, 2]. По данным научных исследований, к таким соединениям можно отнести оксиды некоторых металлов и различные соли. Соединения щелочных металлов, например, способствуют ускорению декарбонизации при обжиге клинкера и оказывают влияние на прочностные характеристики цемента [3, 4], а диоксид титана снижает температуру спекания клинкера и изменяет его фазовый состав [5]. Тяжелые металлы также могут оказывать минерализующее действие без существенного влияния на качество клинкера [6]. Наибольшей минимизации энергетических затрат удастся добиться при использовании фторсодержащих минерализаторов отдельно или комбинированно с другими соединениями [7, 8].

Наиболее изученным и распространенным минерализатором является плавиковый шпат CaF_2 [9, 10]. Существует достаточное количество работ, подробно описывающих высокую эффективность его применения и влияния на процесс обжига и свойства как серого, так и белого клинкера и цемента [11–13]. Однако, несмотря на все

преимущества, использование фторсодержащих минерализаторов в виде руды или концентрата может сопровождаться некоторыми осложнениями. Руда, содержащая плавиковый шпат, – флюорит – залегает на территории России в ограниченном количестве, основные ее запасы находятся в странах Азии. Флюорит имеет широкую область применения в различных отраслях промышленности и в гораздо больших объемах, нежели требуются цементной промышленности. Все это приводит к тому, что флюорит имеет высокую себестоимость. На заводах ввод минерализаторов в сырьевую смесь, в основном, осуществляется вместе с корректирующими добавками или глиной, поэтому трудно осуществить дозирование минерализатора и предусмотреть его поведение [14, 15]. Еще одной проблемой является частичное улетучивание ионов фтора из сырьевой смеси во время обжига и циркулирование его во вращающейся печи наравне с щелочными оксидами, ионами хлора и оксидом серы, которые служат причиной образования настывлей в печном агрегате [16].

В связи с этим поиск альтернативного минерализатора, способного показать достаточную эффективность и не имеющего недостатков, схожих с применением CaF_2 , является весьма актуальным. В качестве источника такого соединения

может выступать техногенный продукт электролитического производства алюминия (электродный бой) [17, 18]. Электродный бой представляет собой техногенный отход производства алюминия, богатый такими элементами как углерод, фтор, натрий, алюминий [19].

Целью данной работы является исследование эффективности использования техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализатора при обжиге клинкера, а также сравнение эффективности минерализующего эффекта электродного боя и фторида кальция. Также научный и практический интерес исследований связан с повышением эффективности использования минерализаторов, то есть со значительным понижением температуры клинкерообразования. Все это позволит решить ряд немаловажных задач при производстве цемента: повышение производительности печи, качества клинкера и цемента, сокращение удельного расхода топлива и электроэнергии при обжиге и помоле клинкера, снижение образования настывлей.

Материалы и методы. Объектом исследования стала сырьевая смесь (табл. 1), рассчитанная на получение рядового клинкера, характеризующегося модулями: $\text{KH} = 0,93$; $n = 2,18$; $p = 1,32$.

Таблица 1

Химический состав сырьевой смеси и клинкера, %

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O	ППП
Сырьевая смесь	13,92	3,63	2,75	43,21	0,86	0,30	0,54	34,80
Клинкер	21,35	5,57	4,22	66,27	1,32	0,46	0,83	–

В качестве минерализующих добавок были использованы реактив фторида кальция и электродный бой, которые вводились в сырьевую смесь сверх 100 % в количестве 1 % по содержанию иона фтора (F). Чтобы оценить минерализующий эффект электродного боя, его использовали уже прокаленным, то есть без углеродной

составляющей. Температура обработки – 700 °С, для исключения возгонки соединений, входящих в состав электродного боя. Химический состав прокаленного электродного боя представлен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав прокаленного электродного боя, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	F^-	K_2O	Na_2O	Σ
0,69	21,55	1,38	1,23	0,44	3,20	0,02	38,08	0,30	32,79	99,68

Основными составляющими электродного боя являются фтор, оксиды натрия и алюминия. Именно эти соединения будут оказывать влияние на процесс клинкерообразования.

Образцы клинкеров исследовались на содержание свободного оксида кальция этилово-глицератным методом.

Комплексный термический анализ выполнялся на современном приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 немецкой фирмы NETZSCH.

Гидратационную активность синтезированных клинкеров определяли по принятой методике в малых образцах. Из полученных цементов

формовали образцы-кубики с размером ребра 1,41 см. Образцы твердели 1 сутки в ванне с гидравлическим затвором над водой, а затем в воде с температурой 20 ± 2 °С.

Основная часть. Одним из вариантов оценки эффективности действия минерализаторов является определение температурного интервала усвоения оксида кальция в клинкерные ми-

нералы. Для оценки связывания свободного оксида кальция из приготовленных смесей прессовались цилиндрические образцы массой 2 г, которые обжигались партиями в лабораторной печи в интервале температур 1100–1450 °С с выдержкой в течение 15 минут и шагом отбора проб 50 °С. Далее каждый образец исследовался на содержание свободного оксида кальция. Кинетические кривые связывания оксида кальция в смесях приведены на рисунке 1.

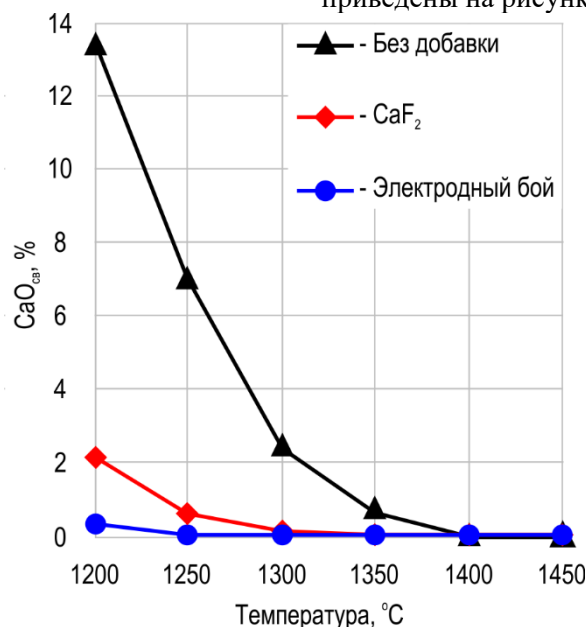


Рис. 1. Кинетика усвоения $\text{CaO}_{\text{св}}$

Полное связывание свободного CaO для смеси без минерализатора фиксируется при температуре 1400 °С.

При введении в сырьевую смесь CaF_2 содержание свободного оксида кальция находится в допустимых пределах уже при температуре 1250 °С, а полностью отсутствует при температуре 1300 °С. Введение в сырьевую смесь электродного боя способствует лучшему связыванию оксида кальция по сравнению с другими образцами. Уже при 1200 °С фиксируется 0,3 % неусвоенного оксида кальция, что свидетельствует о почти полном завершившемся процессе образования клинкерных минералов.

Таким образом, высокая эффективность действия минерализаторов, CaF_2 и электродного боя, на усвоение оксида кальция в клинкерные минералы дает возможность снизить температуру обжига клинкера до 1350 °С.

С целью более подробного рассмотрения процессов, протекающих в высокотемпературном интервале обжига клинкера и способствующих раннему усвоению оксида кальция, проводился дифференциально-термический анализ сырьевых смесей (рис. 2).

Анализ полученных результатов ДТА сырьевых смесей позволяет утверждать, что смеси без

добавления минерализаторов характеризуются четкими экзо- и эндотермическими эффектами при температурах 1236 и 1300 °С, характерными для образования белита и появления клинкерного расплава в системе соответственно.

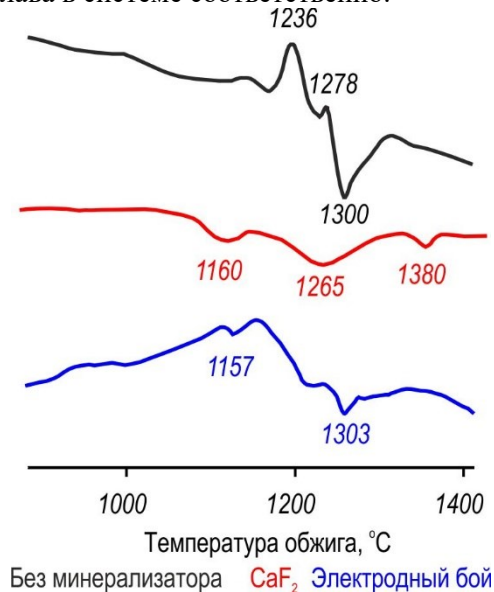


Рис. 2. Кривые ДТА сырьевых смесей

Сырьевые смеси, содержащие в своем составе как фторид кальция, так и электродный бой

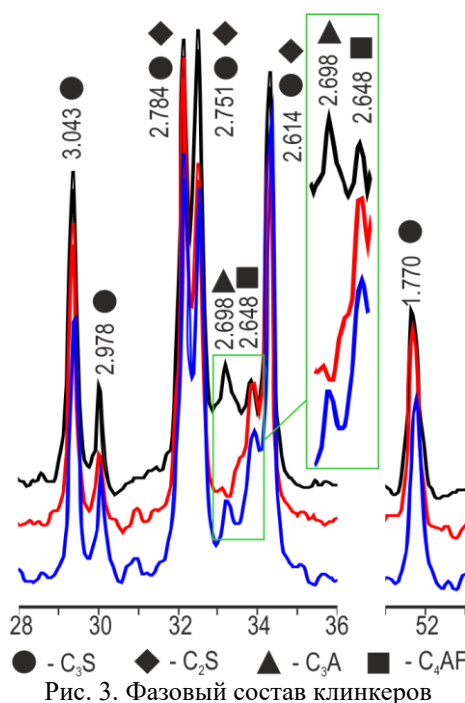
отличаются широким температурным интервалом образования расплава, для них нехарактерно появление четкого термоэффекта, как для бездобавочных смесей. Предположительно это связано с образованием промежуточных соединений сложного состава, имеющих узкий температурный интервал существования. Именно они способствуют раннему появлению расплава, эндотермический эффект которого наблюдается на кривых ДТА в интервале 1150–1160 °С. Из-за различного состава промежуточных соединений плавление происходит не одновременно для всей сырьевой смеси, а частично, захватывая при повышении температуры все больше соединений, увеличивая количество расплава и температурный интервал его существования в системе. Образование белита в данных сырьевых смесях также не имеет четко выраженного термического эффекта, что можно объяснить перекрыванием эндоэффектами образования расплава.

Для проверки возможности снижения температуры обжига клинкеров с добавлением минерализаторов проводился обжиг в лабораторной печи при температуре 1350 °С с выдержкой 1 час. Охлаждение образцов осуществлялось до 1150 °С со скоростью около 20 градусов в минуту и далее резко на воздухе до температуры окружающей среды. Обжиг образцов без минерализаторов осуществлялся при температуре 1450 °С с выдержкой 1 час. Охлаждение клинкера осуществлялось до 1200 °С со скоростью 20 °С/мин и далее резко на воздухе до температуры окружающей среды. Режим охлаждения синтезированных клинкеров соответствует режиму охлаждения промышленного клинкера в зоне охлаждения вращающейся печи и клинкерном холодильнике.

Свойства синтезированных клинкеров изучались с применением рентгенофазового и петрографического анализов, а также определением гидратационной активности по величине прочности на сжатие образцов из затвердевшего цемента на 2, 7 и 28 суток.

Все клинкеры характеризуются наличием основных клинкерных минералов и отсутствием несвязанного оксида кальция (рис. 3). Дополнительные фазы не идентифицированы. Следует от-

метить, что на рентгенограмме клинкера с добавкой фторида кальция отсутствуют дифракционные отражения, соответствующие трехкальциевому алюминату $d, \text{\AA} = 2,69$. Это связано с термической неустойчивостью C_3A в системах с присутствием ионов фтора. Трехкальциевый алюминат в присутствии CaF_2 диссоциирует на $5CaO \cdot 3Al_2O_3$ и свободный CaO . Быстро растворяющиеся в больших количествах в жидкой фазе CaO и $2CaO \cdot SiO_2$ вызывают интенсивное образование $3CaO \cdot SiO_2$. Это подтверждается более высокой интенсивностью дифракционных отражений алита на рентгенограмме $d, \text{\AA} = 3,043; 1,770$. При этом на рентгенограммах клинкеров без добавок дифракционные отражения C_3A четко выражены, с добавкой электродного боя имеют немного меньшую интенсивность относительно бездобавочного клинкера.



Применение добавок-минерализаторов и снижение температуры обжига может оказать существенное влияние на микроструктуру клинкера. Для проверки данного предположения проводился петрографический анализ синтезированных клинкеров (рис. 4).

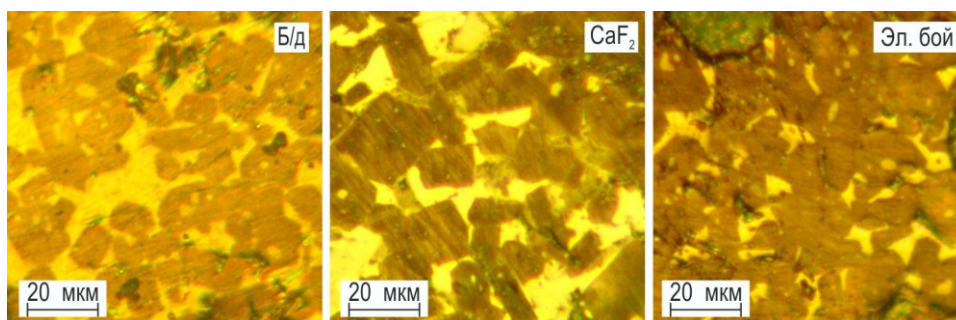


Рис. 4. Фотографии синтезированных клинкеров

Все клинкеры имеют четкую мелкокристаллическую однородную структуру. Алитовая фаза представлена отдельными мелкими кристаллами правильной формы со средним размером 15–20 мкм. Встречаются редкие отдельные зерна размером около 25–30 мкм, которые имеют в основном вытянутую четырехугольную форму. Зерна белита встречаются в клинкере очень редко, они могут представлять собой отдельные кристаллы размером около 10–15 мкм, или же мелкие кристаллы размером около 2–3 мкм, которые включены в структуру кристаллов алита. Отличие клинкеров заключается в количестве промежуточной фазы.

Визуальная оценка дает понять, что клинкеры с добавлением минерализаторов характеризуются очень плотным расположением зерен алита в структуре. Предположительно, данный факт объясняется увеличением содержания зерен алита в клинкере за счет снижения количества трехкальциевого алюмината. Синтезированные при 1350 °С клинкеры с вводом минерализаторов почти не отличаются от бездобавочного клин-

кера по фазовому составу, при этом имеют отличия в микроструктуре. Основными различиями являются размер кристаллов клинкерных минералов и пористость образцов. Клинкеры, полученные при температуре 1450 °С, характеризуются мелкокристаллической равномерной структурой, тогда как снижение температуры до 1350 °С способствует формированию нечеткой структуры с более крупными кристаллами клинкерных минералов и большим количеством пор.

Для определения влияния минерализаторов на размолоспособность проводился помол синтезированных клинкеров в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности $350 \pm 10 \text{ м}^2/\text{кг}$ с добавлением реактива двуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 5). Реактив двуводного гипса вводился из расчета содержания в цементе 3 % SO_3 . Предварительно перед помолом цемента все клинкеры дробились до прохождения через сито с размером ячейки 0,63 мм. Во время измельчения в лабораторной мельнице измерение удельной поверхности осуществлялось каждые пять минут помола.

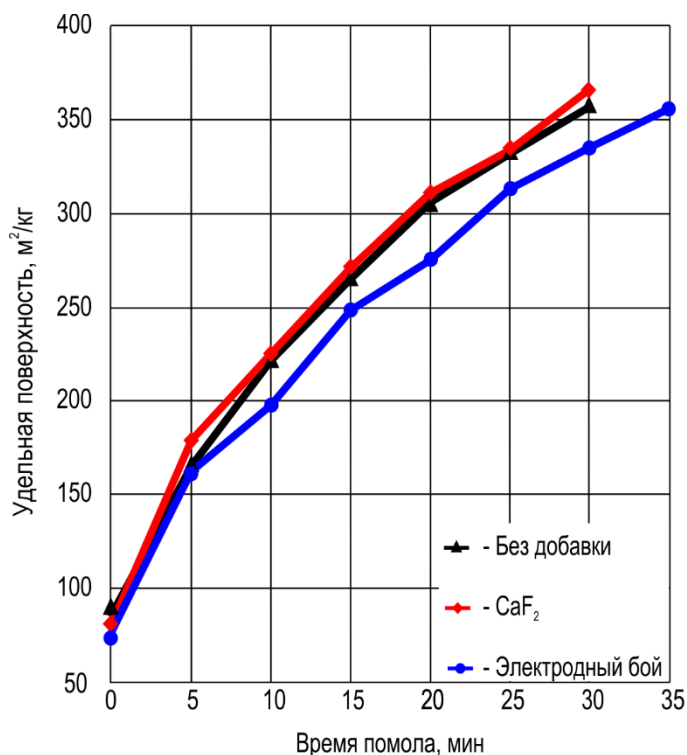


Рис. 5. Размолоспособность клинкеров

Размолоспособность синтезированных клинкеров практически не отличается друг от друга. Изменение удельной поверхности бездобавочного клинкера и клинкера с добавлением фторида кальция носит идентичный характер. Требуемая величина удельной поверхности достигается за 30 минут. Необходимая величина удельной поверхности клинкера, синтезирован-

ного с добавлением электродного боя, достигается за 35 минут. Замедленный набор удельной поверхности по сравнению с другими клинкерами связан с морфологией клинкерных минералов: для них характерна более крупная кристаллизация, в то время как для бездобавочного клинкера характерна мелкокристаллическая структура с большим количеством крупных пор, а для

клинкера, полученного с добавлением CaF_2 – нечеткие сросшиеся плотно расположенные кристаллы.

Сравнивая динамику процесса измельчения клинкеров, синтезированных при температуре $1450\text{ }^\circ\text{C}$ – бездобавочный клинкер, и при более низкой – $1350\text{ }^\circ\text{C}$ с добавлением минерализаторов, стоит отметить, что снижение температуры обжига клинкера не оказывает влияния на размо- лоспособность, что еще раз говорит об идентичности клинкеров и степени их спекаемости.

Оценка влияния минерализаторов на гидратационную активность синтезированных клинкеров, отраженная на рисунке 6, показала, что в

начальные сроки твердения наибольшую прочность при сжатии – $43,1\text{ МПа}$ – показал цемент, полученный из клинкера, синтезированного без добавления минерализаторов, микроструктура которого отличается большим содержанием мелких кристаллов размером $5 - 10\text{ мкм}$, обеспечивающих прочность цементного камня в начальные сроки твердения [20]. Образцы цемента, полученных с добавлением минерализаторов, показали меньшие значения прочности, $31,1$ и $35,9\text{ МПа}$ соответственно. Более медленный набор прочности данных образцов можно объяснить пониженным содержанием в клинкере трехкальциевого алюмината, который обеспечивает набор прочности на начальном этапе твердения.

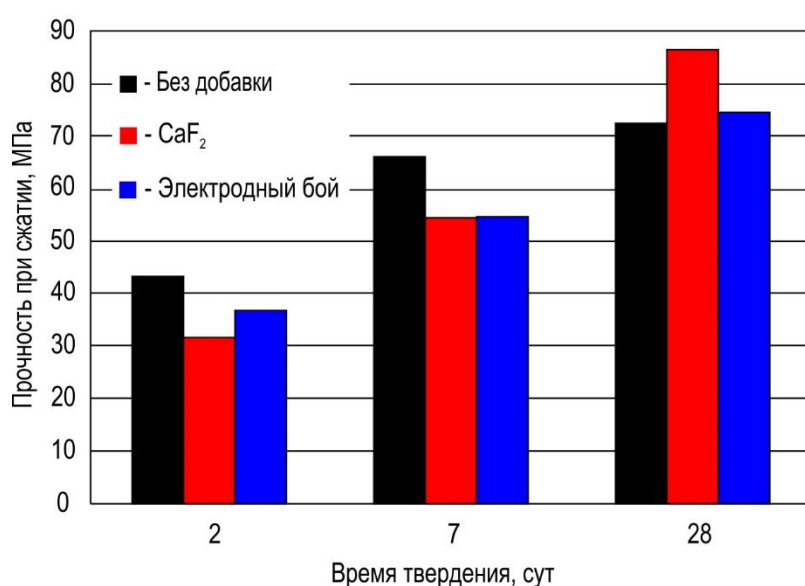


Рис. 6. Прочность при сжатии

К возрасту семи суток динамика набора прочности сохраняется для всех цементов. Прочность бездобавочного образца имеет также наибольшее значение и составляет $66,5\text{ МПа}$. Образцы цемента, полученных с использованием минерализаторов, показали практически идентичные результаты $55,0$ и $55,3\text{ МПа}$ соответственно. Набор прочности в данном возрасте обеспечивается гидратацией мелких кристаллов клинкерных минералов.

К 28-ми суточному возрасту образцы цементов, полученных из клинкеров, синтезированных с использованием фторида кальция и электродного боя, показали значительный прирост прочности до $87,7$ и $73,5\text{ МПа}$. Образец бездобавочного цемента отличается небольшим увеличением прочности на данном сроке до $72,7\text{ МПа}$. Сохранение динамики набора прочности для образцов, полученных из клинкеров, синтезированных с использованием минерализаторов, объясняется более крупнокристаллической структурой

клинкера, частицы которого в силу большего размера гидратируют и повышают прочность цементного камня в более поздние сроки. Образец цемента, синтезированного с введением электродного боя, несколько уступает в прочности образцу, полученному с использованием фторида кальция, так как микроструктура клинкера, на основе которого был получен цемент, отличается более четкой кристаллизацией клинкерных минералов правильной формы крупного размера, что в свою очередь замедляет процесс гидратации, тогда как клинкер, синтезированный с фторидом кальция, характеризуется дефектной структурой с кристаллами неправильной формы.

Следовательно, прочность цементов, полученных из клинкеров, которые синтезированы с использованием минерализаторов, несмотря на понижение температуры обжига, не уступает прочности цементов, полученных из бездобавочных клинкеров, и при этом обеспечивается более высокая активность цементов в 28-ми суточном

возрасте, что объясняется формированием более крупнокристаллической структуры клинкеров.

Снижение температуры обжига клинкера при введении минерализаторов до 1350 °C будет способствовать снижению удельного расхода тепла на обжиг. Основные расходные статьи теплового баланса печной системы, по которым происходит снижение удельного расхода тепла на обжиг клинкера, – снижение потерь тепла с отходящими газами и через корпус вращающейся печи. Согласно проведенным расчетам общая экономия удельного расхода условного топлива составит 6 кг/т клинкера.

Выводы.

1. Техногенный продукт электролитического производства алюминия обладает минерализующим эффектом, который обеспечивается высоким содержанием фтора, и может быть использован в качестве добавки при обжиге клинкера. Эффективность минерализующего действия электродного боя не уступает традиционному минерализатору – фториду кальция.

2. Полное усвоение оксида кальция в клинкерные минералы завершается на 100...150 °C раньше по сравнению с бездобавочной смесью при использовании минерализаторов, что позволило снизить температуру обжига клинкера до 1350 °C. При этом усвоение оксида кальция при вводе электродного боя завершается на 50 °C раньше, чем при вводе фторида кальция CaF₂.

3. Снижение температуры обжига клинкеров при добавлении электродного боя и фторида кальция не оказывает существенного влияния на фазовый и минералогический состав, размолоспособность и гидратационную активность по сравнению с бездобавочным клинкером, синтезированным при стандартной температуре.

4. Снижение температуры обжига клинкера при использовании техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализующей добавки позволит снизить удельный расход условного топлива на 6 кг/т клинкера за счет снижения температуры отходящих газов и потерь тепла через корпус печной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E. M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker // *Cement and Concrete Research*. 2018. 105. Pp. 72–80. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.01.006
2. Mehta P.K., James R.B. Utilization of phosphogypsum in portland cement industry // *Cement and Concrete Research*. 1977. 7(5). Pp. 537–544. doi: 10.1007/s10163-012-0065-x
3. Klassen V.K., Ermolenko E.P., Novosyolov A.G., Mishin D.A. Problem of impurity of salts of alkali metals in cement raw materials // *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013. 17 (8). Pp. 1130–1137. URL: [http://idosi.org/mejsr/mejsr17\(8\)13/18.pdf](http://idosi.org/mejsr/mejsr17(8)13/18.pdf). doi:10.5829/idosi.mejsr.2013.17.08.7087
4. Новоселов А.Г., Васина Ю.А., Новоселова И.Н., Горяйнова Д.Н., Ершова Ю.И. Исследование возможности снижения циркуляции летучих соединений во вращающейся печи сухого способа производства // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. №7. С. 84–92. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-84-92
5. Мишин Д.А., Барбанягрэ В.Д., Черкасов А.В. Процессы клинкерообразования в присутствии минерализаторов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2017. 100 с.
6. Kolovos K.G. Waste ammunition as secondary mineralizing raw material in Portland cement production // *Cement and Concrete Composites*. 2006. 28(2). Pp. 133–143. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.001
7. Larbi K., Angélique S.-M., Abdelhamid G., Zoubir D. Influence of NaF, KF and CaF₂ addition on the clinker burning temperature and its properties // *Comptes Rendus Chimie*. 2006. 9(1). Pp. 154–163. doi: 10.1016/j.crci.2005.10.001
8. Yongqi D., Tingshu H., Chen S., Minhao W., Yun F. Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. 403. 123692. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123692
9. Yu L., Gao X., Lu L., Cheng X. The effect of CaF₂ on the synthesis and properties of cement in the "alite-barium-calcium sulfoaluminate cement" system // *J. Jinan Univ. Sci. and Technol.* 2006. 20. №2. Pp. 108–110.
10. Бахареv М. В., Москаленко А. Н. Искусственный плавиковый шпат и его применение в цементной промышленности // *Цемент и его применение*. 2016. №2. С. 50–53.
11. Лугинина И.Г. Избранные труды. Белгород: Изд-во БелГТАСМ. 2002. 302 с.
12. Остапчук О.В., Сычева Л.И. Влияние добавок на спекание белого клинкера // *Успехи в химии и химической технологии*. Вып. 14. Тезисы докладов 14-й Международ. конференции молодых ученых по химии и химической технологии. МКХТ-200. Москва. Дек. 2000. Ч. 2. М.: Изд-во РХТУ. 2000. 75 с.
13. Novosyolov A.G., Ershova Y.I., Novoselova I. N., Vasina Y. A. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker // *Digital Technologies in Construction Engineering*,

Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. 173. Pp. 251–257. doi:10.1007/978-3-030-81289-8_32.

14. Черкасов А.В., Мишин Д.А., Перескок С.А. Использование плавикового шпата для увеличения производительности цементной вращающейся печи // Технологии бетонов. 2014. №7. с. 24–25.

15. Черкасов А.В., Мишин Д.А., Лугинина И.Г. Эффективность использования плавикового шпата на цементных заводах // Междун. пр. конференция «Инновационные материалы и технологии» Белгород, 11 – 12 окт., 2011: Сб. докладов. Ч. 3. Белгород. 2011. С. 243–245.

16. Новоселов А.Г., Олянина И.В., Новоселова И.Н., Васина Ю.А., Ершова Ю.И., Куделина Я.И., Лоик Т.А. Исследование возможности снижения циркуляции оксида серы при производстве белого цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №7. С. 89–98. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-89-98

17. Куликов Б.П., Николаев М.Д., Кузнецов А.А., Пигарев М.Н. Утилизация фторсодержащих отходов алюминиевого производства в цементной промышленности // Экология и промышленность России. 2010. №5. С. 4–6.

18. Куликов Б.П., Николаев М.Д., Кузнецов А.А., Барин В.В., Пырков И.В. Получение клинкера с использованием минерализатора на основе фторсодержащих отходов // Цемент и его применение. 2010. №2. С. 102–105.

19. Сайт об алюминии [Электронный ресурс]: Как производится алюминий // ОК Русал. Город: Москва. 2017. URL: https://aluminiumleader.ru/production/how_aluminium_is_produced (дата обращения: 12.12.2021)

20. Штарк Й., Вихт Б. Цемент и известь. Пер. с нем. А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. Киев. 2008. 470 с.

Информация об авторах

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дреер Юлия Ивановна, аспирант. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Васина Юлия Андреевна, аспирант. E-mail: vasinajulia1511@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.03.2022 г.

© Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А., 2022

**Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Vasina Yu.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: novosyolovag@yandex.ru*

EFFICIENCY OF USING A TECHNOGENIC PRODUCT OF ELECTROLYTIC PRODUCTION OF ALUMINUM AS A MINERALIZER WHEN FIRING PORTLAND CEMENT CLINKER

Abstract. The possibility of using a technogenic product of the electrolytic production of aluminum (crushed electrodes) as a mineralizing additive during clinker burning is considered. The effectiveness of the action of the mineralizing effect of crushed electrodes and the classical mineralizer - calcium fluoride CaF_2 is compared. The amount of mineralizers introduced during clinker burning is 1% according to the content of fluorine ion in the raw mixture. The effectiveness of the action of mineralizers is evaluated by determining the temperature range for the assimilation of calcium oxide into clinker minerals. Calcium oxide is completely assimilated by 1300°C when calcium fluoride CaF_2 is introduced into the raw mix. Introduction to the raw mixture of crushed electrodes contributes to the complete assimilation of calcium oxide to a temperature of 1250°C. For additive-free clinker, complete assimilation of calcium oxide occurs at 1400°C. The assimilation of calcium oxide at lower temperatures in mixtures with the addition of calcium fluoride and crushed electrodes allows to reduce the burning temperature of the clinker to 1350°C without losing the quality of the

resulting clinker. Reducing the clinker burning temperature when using mineralizers will reduce the specific consumption of conventional fuel by about 6 kg per ton of clinker.

Keywords: *crushed electrodes, mineralizers, replacement of calcium fluoride, clinker burning temperature, reduction of heat consumption.*

REFERENCES

1. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E.M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker. *Cement and Concrete Research*. 2018. No. 105. Pp. 72–80. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.01.006
2. Mehta P.K., James R.B. Utilization of phosphogypsum in portland cement industry. *Cement and Concrete Research*. 1977. No. 7(5). Pp. 537–544. doi:10.1007/s10163-012-0065-x
3. Klassen V.K., Ermolenko E.P., Novosyolov A.G., Mishin D.A. Problem of impurity of salts of alkali metals in cement raw materials. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013. 17 (8). Pp. 1130–1137. doi:10.5829/idosi.mejsr.2013.17.08.7087
4. Novosyolov A.G., Vasina Yu.A., Novoselova I.N., Goriaynova D.N., Ershova Yu.I. Research of the possibility of reducing the circulation of volatile compounds in the rotary kiln of the dry method of production [Issledovanie vozmozhnosti snizheniya tsirkulatsii letuchih soedineniy vo vroschayushcheysya pechi suhogo sposoba proizvodstva]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No.7. Pp. 84–92. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-84-92 (rus)
5. Mishin D.A., Barbaniagre V.D., Cherkasov A.V. Clinker formation processes in the presence of mineralizers. [Processy klinkeroobrazovaniya v prisutstvii mineralizatorov]. *BSTU named after V.G. Shukhov*. Belgorod. 2017. 100 p. (rus)
6. Kolovos K.G. Waste ammunition as secondary mineralizing raw material in Portland cement production. *Cement and Concrete Composites*. 2006. No. 28(2). Pp. 133–143. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.001
7. Larbi K., Angélique S.-M., Abdelhamid G., Zoubir D. Influence of NaF, KF and CaF₂ addition on the clinker burning temperature and its properties. *Comptes Rendus Chimie*. 2006. No. 9(1). Pp. 154–163. doi: 10.1016/j.crci.2005.10.001
8. Yongqi D., Tingshu H., Chen S., Minhao W., Yun F. Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. 403. 123692. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123692
9. Yu L., Gao X., Lu L., Cheng X. The effect of CaF₂ on the synthesis and properties of cement in the "alite-barium-calcium sulfoaluminate cement" system. *J. Jinan Univ. Sci. and Technol.* 2006. 20. No. 2. Pp. 108–110.
10. Baharev M.V., Moskalenko A.N. Artificial fluorspar and its application in the cement industry. [Iskusstvennyj plavikovyj shpat i ego primeneniye v cementnoj promyshlennosti]. *Cement and its application*. 2016. No 2. Pp. 50–53. (rus)
11. Luginina I.G. Selected Works. [Izbrannye trudy]. Belgorod: publishing house BelSTABM. 2002. 302 p. (rus)
12. Ostapchuk O.V., Sycheva L.I. The effect of additives on the sintering of white clinker. [Vliyaniye dobavok na spekanie belogo klinkera]. *Advances in chemistry and chemical technology*. 14. Abstracts of the 14th International Conference of Young Scientists in Chemistry and Chemical Technology. MKHT-200. Moscow. Dec. 2000. P. 2. M.: publishing house Mendeleev Russian Technical University. 2000. 75 p. (rus)
13. Novosyolov A.G., Novoselova I. N., Vasina Y. A., Ershova Y.I. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker. *Digital Technologies in Construction Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. 173. Pp. 251–257. doi:10.1007/978-3-030-81289-8_32.
14. Cherkasov A.V., Mishin D.A., Pereskok S.A. The use of fluorspar to increase the productivity of a cement rotary kiln. [Ispol'zovanie plavikovogo shpata dlya uvelicheniya proizvoditel'nosti cementnoj vrashchayushcheysya pechi]. *Concrete technologies*. 2014. No. 7. Pp. 24–25. (rus)
15. Cherkasov A.V., Mishin D.A., Luginina I.G. The efficiency of the use of fluorspar in cement plants. [Effektivnost' ispol'zovaniya plavikovogo shpata na cementnyh zavodah]. *International Practical Conference "Innovative materials and technologies"* Belgorod, 11-12 Oct., 2011: Collection of reports. Part 3. Belgorod. 2011. Pp. 243–245. doi: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-89-98 (rus)
16. Novosyolov A.G., Olianina I.V., Novoselova I.N., Vasina Y.A., Ershova Y.I., Kudelina Ja.I., Loik T.A. Research of the possibility of reducing the circulation of sulfur oxide in the production of white cement. [Issledovanie vozmozhnosti snizheniya tsirkulyatsii oksida sery pri proizvodstve belogo cementa]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 7. Pp. 89–98. (rus)
17. Kulikov B.P., Nikolaev M.D., Kuznetsov A.A., Pigarev M.N.: Utilization of fluorinated waste from aluminum production in the cement industry. [Utilizatsiya florsoderzhashchih othodov al-

yuminievogo proizvodstva v cementnoj promyshlennosti]. Ecology and Industry of Russia. 2010. No. 5. Pp. 4–6. (rus)

18. Kulikov B.P., Nikolaev M.D., Kuznetsov A.A., Barinov V.V., Pyrkov I.V. Production of clinker using a mineralizer based on fluorinated waste. [Poluchenie klinkera s ispol'zovaniem mineralizatora na osnove ftorsoderzhashchih othodov]. Cement and its application. 2010. No. 2. Pp. 102–105. (rus)

19. Website about aluminum [Electronic resource]: How aluminum is produced. OK Rusal. City: Moscow. 2017. URL: https://aluminumleader.ru/production/how_aluminium_is_produced (date of application: 12.12.2021) (rus)

20. Stark J., Vikht B. Cement and lime. German translation A. Tulaganova. Edited by P. Krivenko. Kiev. 2008. 470 p.

Information about the authors

Novosyolov, Alexey G. PhD. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dreer, Yulya I. postgraduate. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Vasina, Yulia A. postgraduate. E-mail: vasinajulia1511@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 03.03.2022

Для цитирования:

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А. Эффективность использования техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализатора при обжиге портландцементного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-71-80

For citation:

Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Vasina Yu.A. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic production of aluminum as a mineralizer when firing portland cement clinker. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-71-80

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90

¹Бухаров К.Д., ¹Гришин Н.А., ¹Кудров М.А., ^{2,*}Рыбак Л.А., ²Черкасов В.В.¹Московский физико-технический институт²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: rl_bqtu@intbel.ru

АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ШЕСТИСТЕПЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ И ТРЕНАЖЕРОВ

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты применения методов математического моделирования для анализа свойств шестистепенных роботизированных платформ подвижности (РПП), которые могут быть использованы в качестве испытательных стендов и симуляторов для тестирования различной техники: дорожно-строительной, автотранспортной, авиационной, ракетно-космической и т.д. Применение тренажеров позволило создать виртуальную среду взаимодействия пользователя с конкретным специальным видом техники, которая реагирует на команды подобно настоящей. В статье рассмотрен также численный метод решения обратной задачи кинематики РПП, который состоит в определении зависимости изменения длин шести приводных штанг (прямолинейных привода) от шести координат (трех поступательных и трех вращательных), характеризующих положение подвижной платформы в пространстве. Выполнено математическое моделирование кинематики РПП. В качестве исходных данных для расчета системы управления РПП выбраны данные о требуемом линейном и угловом положении подвижной платформы РПП, а также положения штоков и скорости штоков приводных механизмов на базе электроцилиндров.

В результате моделирования получена выборка, соответствующая требованиям по величине хода штока электроцилиндров. Представлены результаты математического моделирования для множества позиционных параметров РПП. Численное моделирование поставленной оптимизационной задачи было выполнено для выбранной конфигурации геометрических параметров подвижной платформы РПП.

Ключевые слова: платформа, роботизация, траектория, конфигурация, гексапод, тренажер, моделирование, цифровизация, проектирование.

Введение. Внедрение различной роботизированной техники в производство способствует интенсивному развитию промышленности по всему миру. В связи с этим возрос интерес исследователей к оптимизации, анализу и модернизации существующих конструкций, и проектированию совершенно новых. Роботизированные платформы подвижности на базе гексаподов отличаются от роботов последовательной структуры наличием нескольких связей между неподвижным основанием и подвижной платформой, это позволяет расположить рабочий орган ближе к несущим основаниям, что существенно увеличивает эффективную грузоподъемность и обеспечивает высокую точность позиционирования, однако из-за большого количества кинематических связей рабочая область существенно ограничена [1–6]. Данные механизмы могут использоваться в тех отраслях промышленности в которых важна точность и грузоподъемность, а размеры рабочей области является второстепенным параметром.

Роботизированные платформы подвижности широко применяются в различных испытательных стендах, тренажах в качестве учебно-тренировочных комплексов для обучения водителей

дорожно-строительной техники, транспортных машин, специальной техники, техники военного назначения, авиационной и ракетно-космической. Спектр применения РПП постоянно расширяется. Для повышения качества обучения и снижения затрат наиболее эффективным способом обучения является не обучение управлению реальной машиной, а использование компьютерного тренажера (симулятора). В связи с этим водитель получает необходимые навыки, чтобы, впоследствии управлять реальной машиной с минимально возможными затратами и исключением последствий, связанных с неосторожными действиями оператора (водителя), которые могут привести к возникновению неисправностей машины или нанести вред окружающей среде. При создании тренажера широко внедряется принцип виртуальной реальности с использованием трехмерной модели местности [7]. Применительно к симуляторам дорожно-строительной техники подобные модели позволяют воссоздать условия эксплуатации и рельефа местности максимально приближенные к реальным. Понятно, что чем ближе виртуальная модель к реальному прототипу, тем качественнее созданный симулятор.

Пример тренажера показан на рисунке 1. Тренажер может быть использован для симуляции различного вида грузоподъемной техники: башенных кранов, портовых кранов, мостовых кранов и т.д.

Тренажер можно использовать как для обучения, так и для аттестации, повышения квалификации и т.д.

Известны различные тренажеры и симуляторы для обучения работе на экскаваторах, бульдозерах, кранах (автокран, башенный, мостовой,

козловой), погрузчиках (вилочный, фронтальный), тракторах, комбайнах [8]. Учебный тренажер "Экскаватор-студент" является компьютерным симулятором экскаватора, предназначенным для обучения по профессии машинист экскаватора. Он позволяет освоить управление гусеничным экскаватором и тренировать выполнение наиболее характерных для этой техники рабочих задач: разработка грунтов, рытье траншей и т.п. Тренажер содержит все основные органы управления гусеничным экскаватором. Усилия на джойстиках и рычагах близки к реальной технике



Рис. 1. Тренажер башенного крана [7]

Методы исследований. Важным направлением при разработке стендов и роботизированных платформ для тренажеров является использование имитационного моделирования с 3D-моделью РППК для получения и корректировки ошибок системы управления. В работе [9] рассмотрены различные методы моделирования роботизированных платформ подвижности с использованием сред численного моделирования MatlabSimulink и Catia. Выполнено сравнение полученных результатов, показывающих изменение координат верхних шарниров платформы, построенных в SimMechanics и Catia с теоретическими зависимостями, полученными с использованием приложения MathCad. Также показано, что точность моделирования в среде Matlab выше чем 1×10^{-4} мм, в то время как Catia обеспечила среднюю точность позиционирования шарниров $2,5 \cdot 10^{-3}$. Также необходимо отметить, что среда Matlab имеет более широкие возможности

и позволяет подключать множество инструментов для изучения модели, создавать свои собственные модули и разрабатывать собственные программы управления моделью. При этом, наглядность результатов не всегда характеризует свойства и параметры изучаемого объекта, в связи с чем возникает необходимость задавать множество свойств применяемых модулей.

В работе [9] показано, что модель, сделанная в Catia, характеризуется меньшей точностью изображения, однако визуализация результатов вычислений значительно выше. В данной программной среде построена модель РПП с фотографической точностью, при этом многие физические данные деталей, позволили упростить параметризацию модели в Matlab. На рисунке 3 приведены модели платформы Гофа-Стюарта, построенных в MatlabSimulink и Catia [9, 10].



Рис. 2. Учебный тренажер – «Экскаватор-студент» [8]

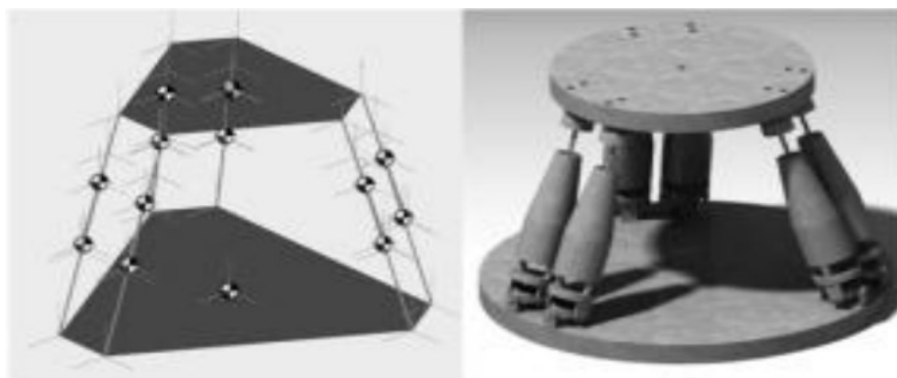


Рис. 3. Внешний вид моделей в MatlabSimulink и Catia [9, 10]

В работе [11] проведено сравнение широкого перечня средств для численного моделирования роботизированных платформ подвижности, в том числе: Maple, Mathematica, Matlab, Vissim, Maxima, Scilab, MathCad.

В работе [10] авторами представлена имитационная динамическая модель гексапода с прямолинейными приводами на основе шаговых двигателей. Приведена реализация модели динамических характеристик трения, происходящих в прямолинейном приводе, а также система управления приводом в среде численного моделирования MatlabSimulink. Проведены тесты с изменением положения верхней платформы и дальнейшим проведением расчётов.

В работах [12, 13] представлены результаты применения позиционного шагового двигателя в составе приводных механизмов платформы подвижности при наличии существенных сил трения и действии инерционной нагрузки. Кроме

того, предполагается возникновение колебательных процессов в установившемся режиме управления движением привода платформы.

Анализ кинематики РПП и результатов моделирования в среде MatlabSimulink, приведенный в [14] показал, что точность позиционирования и ориентации верхней платформы в существенной степени зависит от кинематических параметров механизма. Для увеличения точности при заданной погрешности изменения длин штанг РПП необходимо уменьшать расстояния между точками установки смежных шарниров основания и платформы, установки шарниров основания, а также значение нулевой высоты верхней платформы должно быть близким к диаметру делительной окружности установки смежных шарниров основания.

В качестве объекта исследования рассмотрим платформу Гофа-Стюарта, также называемую гексаподом, которая имеет 6 степеней свободы и представляет собой механизм, состоящий

из 2 платформ. Подвижная платформа соединена с неподвижной посредством 6 телескопических звеньев, имеющих на обоих концах сферические шарниры. Шарниры на неподвижной платформе расположены попарно симметрично по всей окружности с углом поворота 120° . Центры шарниров подвижной платформы образуют равносторонний треугольник. Желаемое положение и ориентация подвижной платформы достигается изменением длин приводных звеньев.

Цели и задачи. Для построения системы управления РПП необходимо решить обратную задачу кинематики, т.е. определить зависимости изменения длин шести штанг (приводных механизмов) от шести координат (трех поступательных и трех вращательных), характеризующих положение верхней платформы в пространстве. В качестве исходных данных для расчета системы управления электроцилиндрами (ЭЦ) РПП используется результирующее положение подвижной платформы т.е. требуемые линейные координаты и углы ориентирующие подвижную платформу в пространстве (углы Эйлера). Заданием для АСУ ЭЦ являются положения штоков и скорости штоков ЭЦ. Рассмотрим численный метод решения обратной задачи кинематики для анализа свойств РПП на базе гексапода.

Решение обратной задачи кинематики РПП.

Решение обратной задачи кинематики РПП основано на матричных преобразованиях. Для их построения рассмотрим кинематическую модель подвижной платформы Стюарта [15-20], приведенной в виде эквивалентной схемы, как показано на рисунке 4. Введем две правосторонние декартовы системы координат нижней платформы А – $Oxyz$ и верхней платформы В – $Ox'y'z'$, расположенных в центрах тяжести соответствующих платформ. Оси z и z' направлены ортогонально из плоскости нижней и верхней платформ соответственно. Оси двух систем координат совмещены в моменте, когда подвижная платформа В находится в исходном положении.

Узлы a_i и b_i являются соединениями i -го подвижного стержня на нижней и верхней платформе соответственно. Положение верхней подвижной платформы может быть представлено с помощью 6 переменных: $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, где (x, y, z) – координаты верхней платформы в системе координат $x'y'z'$, (α, β, γ) – углы поворота верхней платформы А относительно осей z', y' и x' соответственно.

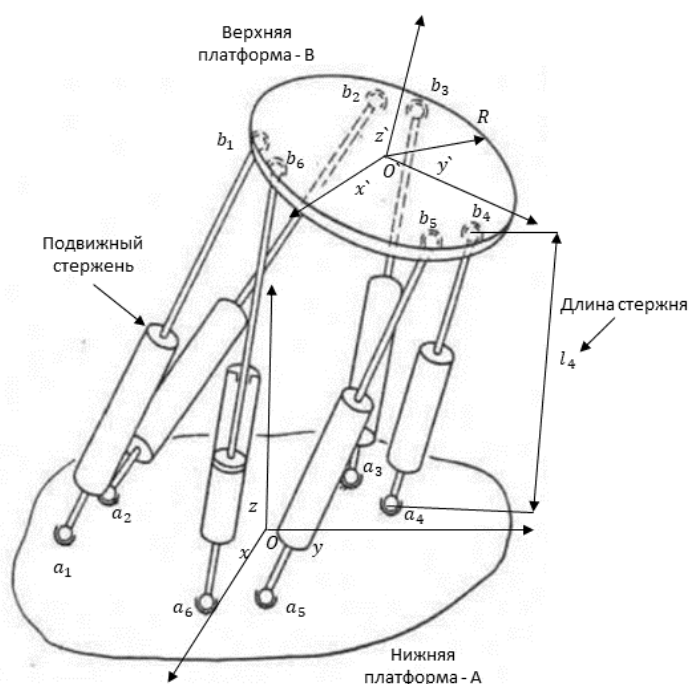


Рис. 4. Внешний вид шестистепенной платформы Стюарта 6-6

Пусть $(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})^T$ обозначает координату узла a платформы А, а $(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T$ – координату b_i платформы В. Тогда обратная кинематическая модель платформы Стюарта может быть записана следующим образом:

$$\|(x, y, z)^T + M(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T - (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})^T\|_2 = l_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (1)$$

где l_i – длина i -го подвижного стержня; M – матрица вращения, определяемая по формуле:

$$M = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Параметризация кинематической модели подвижной платформы Стюарта задается с помощью набора точек a_i нижнего основания А следующим образом:

$$\begin{aligned} a_1 &= (R \cos\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right), 0), \\ a_2 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(120 - \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(120 - \theta)}{360}\right), 0), \\ a_3 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(120 + \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(120 + \theta)}{360}\right), 0), \\ a_4 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(240 - \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(240 - \theta)}{360}\right), 0), \\ a_5 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(240 + \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(240 + \theta)}{360}\right), 0), \\ a_6 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(-\theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(-\theta)}{360}\right), 0), \end{aligned} \quad (3)$$

где R – радиус нижнего основания; θ – угол для нижнего основания.

Таким образом, обратная задача кинематики для РПП заключается в отображении вектора положения верхней платформы $B(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ в вектор длин подвижных стержней $L = (l_1, \dots, l_6)^T$ платформы.

Численное решение данной задачи достигается путем моделирования заданного набора последовательных положений верхней платформы. Формирование таких наборов может быть сведено к описанию законов движения во временной области для верхней платформы в следующем виде:

$$\vec{X} = \vec{A}_0 + \sum_{i=1}^N \vec{A}_i \sin(2\pi \vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \quad (4)$$

где $\vec{X}$ – координаты положения платформы $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$; $\vec{A}_i$ – вектор амплитуд для i -ой частоты движения координат положения платформы; $\vec{v}_i$ – вектор частоты движения координат положения платформы; $\vec{\Phi}_{0_i}$ – начальная фаза для

i -ой частоты движения координат положения платформы; T – время движения платформы.

Таким образом могут быть заданы скорость и ускорение верхней платформы для заданного момента времени t : $\dot{\vec{X}}$, $\ddot{\vec{X}}$ соответственно:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= \sum_{i=1}^N 2\pi \vec{v}_i \vec{A}_i \cos(2\pi \vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \\ \ddot{\vec{X}} &= - \sum_{i=1}^N 4\pi^2 \vec{v}_i^2 \vec{A}_i \sin(2\pi \vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \end{aligned} \quad (5)$$

Такая запись позволяет формировать законы движения верхней платформы с заданной точностью во временной области и обеспечить заданные спектральные характеристики движения.

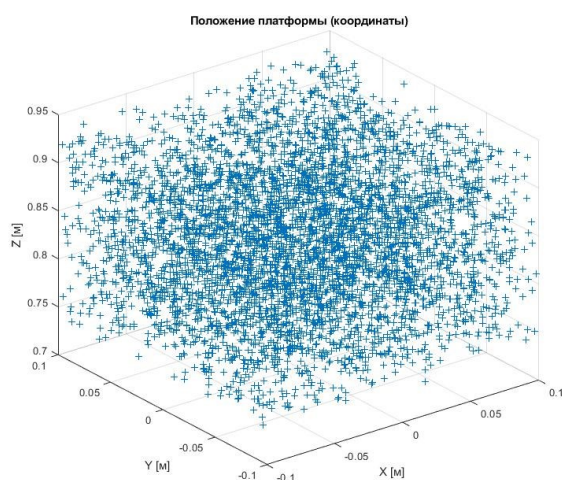
Исходное множество позиционных параметров $\{Q_k | k = 1, \dots, n\}$ для численного моделирования множества положений (длин) подвижных

стержней $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$ задано в таблице 1. Графическая интерпретация положений и ориентации верхней подвижной платформы приведена на рисунках 5а и 5б.

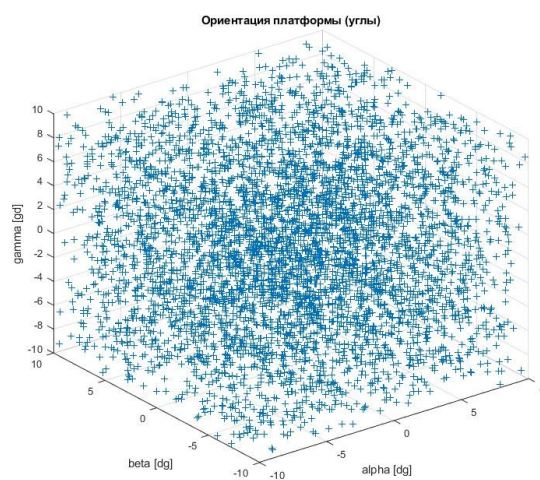
Таблица 1

Описание множества позиционных параметров РПП первого типа

Наименование параметра	Значение параметра						Размер выборки [шт.]
	x [м]	y [м]	z [м]	α °	β °	γ °	
Значение параметра	-0,1; 0,1	-0,1; 0,1	0,73; 2,74	-10; 10	-10; 10	-10; 10	5000



а)



б)

Рис. 5. Распределение позиционных переменных подвижной платформы:
а) положение подвижной платформы; б) ориентация подвижной платформы

Численное моделирование поставленной оптимизационной задачи было выполнено для кон-

фигурации геометрических параметров подвижной платформы, приведенной в таблице 2, согласно обозначениям, на рисунке 4.

Таблица 2

Геометрические параметры подвижной платформы

Наименование параметра	Угол поворота между верхним и нижним основанием платформы	Угол нижнего основания	Радиус нижнего основания
Значение параметра	$\phi = 0^\circ$	$\theta = 14^\circ$	$R = 1$ м

Путем численного моделирования на основе уравнения (1) была получена выборка $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$. Соответствующие максимальное и минимальное значение выборки составляет $\min(L_k) = 0,64$ и $\max(L_k) = 1,38$. Данные зна-

чения соответствуют требованиям по минимальной и максимальной величине ходе штока электроцилиндров, приводящих в движение РПП. На рисунке 4 изображено распределение положений шести подвижных стержней для каждого элемента выборки $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$.

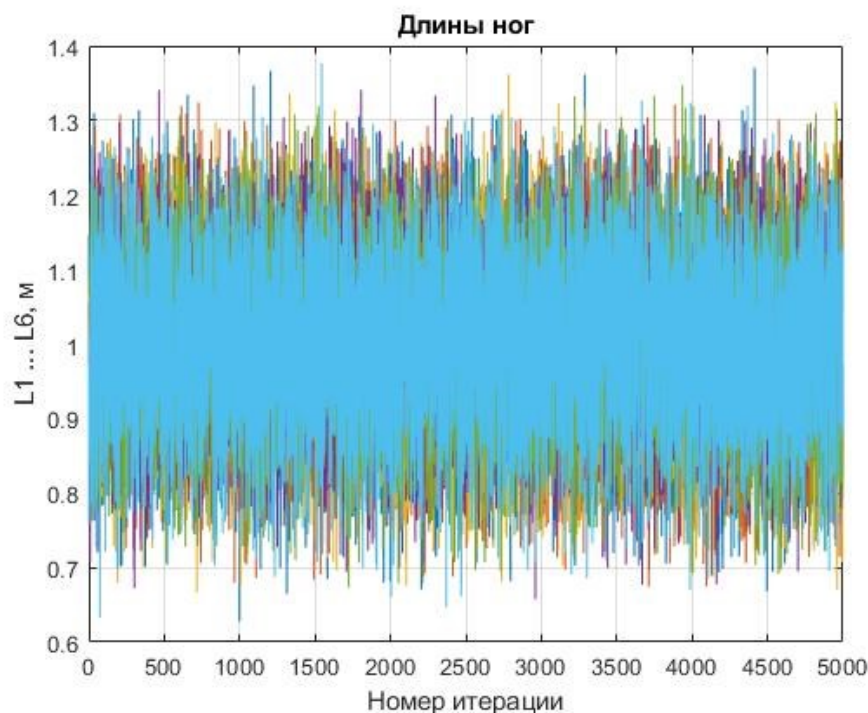


Рис. 6. Распределение положений подвижных стержней РПП, соответствующее множеству позиционных параметров Q_k

Заключение. Выполнено математическое моделирование кинематики РПП, с применением методов численного и линейного программирования в специализированных средах таких как MatlabSimulink. В результате моделирования получена выборка длин звеньев $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$. Соответствующие максимальное и минимальное значение длин составляют $\min(L_k) = 0,64$ м. и $\max(L_k) = 1,38$ м. Данные значения соответствуют требованиям по предельным величинам хода штоков электроцилиндров, приводящих в движение РПП. Результаты решения обратной задачи кинематики могут быть успешно использованы для формирования структуры системы управления в качестве исходных данных для выбора и настройки параметров регулятора в системе с обратной связью по ошибке.

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-11-2021-060 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства роботизированных 6DOF платформ подвижности для тренажеров и симуляторов для авиационной и ракетно-космической отрасли» (уникальный номер 000000S407521QLB0002)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi: 10.1007/978-3-540-71990-8

2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.

3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042092

4. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0_3.

5. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi: 10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68

6. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi: 10.3103/S1052618815070122

7. Чурин В.В. Использование компьютерных тренажеров для подготовки рабочих дорожно-строительных профессий // Молодой ученый. 2011. Т. 4. № 3. С. 28–29.

8. Белякова А.В., Савельев Б.В. анализ информационных моделей тренажеров для обучения водителей транспортных средств (обзор) // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(5). С. 558–571
9. Воронин А.В., Шпякин И.К. Моделирование кинематической модели гексапода в программных комплексах Matlab Simulink и Catia // X Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии» (13-14 ноября, 2012, г. Томск, Россия). 2012. С. 261–263
10. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
11. Сапунов Е.А., Прошин И.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Авиационно-космическое машиностроение. 2011. С. 337–340
12. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator // Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.
13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7_23
14. Коротков Е.Б., Матвеев С.А., Яковенко Н.Г. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.
15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy // Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi: 10.1007/s00170-007-1360-x
16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators // IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi: 10.1109/TRO.2004.833801
17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm // IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi: 10.1109/ICMA.2006.257695
18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process // Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169. doi: 10.1177/0954406212444508
19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms // Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128.
20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms // CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14–17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99

Информация об авторах

Бухаров Кирилл Дмитриевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: bukharovkd@gmail.com. Московский физико-технический институт. Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Гришин Никита Александрович, инженер. E-mail: grishin.na@phystech.edu. Московский физико-технический институт. Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Кудров Максим Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией информационных технологий и прикладной математики. E-mail: mkudrov@mail.ru. Московский физико-технический институт Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Черкасов Владислав Витальевич, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: labbgtugos@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Поступила 13.12.2021 г.

© Бухаров К.Д., Гришин Н.А., Кудров М.А., Рыбак Л.А., Черкасов В.В., 2022

¹Bukharov K.D., ¹Grishin N.A., ¹Kudrov M.A., ^{2,*}Rybak L.A., ²Cherkasov V.V.¹Moscow Institute of Physics and Technology¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: rl_bqtu@intbel.ru

KINEMATICS ANALYSIS OF A 6-DOF ROBOTIC MOBILITY PLATFORM FOR TEST BENCHES AND SIMULATORS

Abstract. The article discusses the main aspects of the application of mathematical modeling methods to analyze the properties of 6-DOF robotic mobility platforms (RMP), which can be used as complete test benches and simulators for testing various equipment, road construction equipment, vehicles, aviation, rocket and space. The application of simulators made it possible to create a virtual environment for user interaction with a special type of equipment that responds to commands like a real one. In addition, the article considers a numerical method for solving the inverse kinematics problem of the RMP, which consists in determining the dependence of the change in the lengths of six drive rods (rectilinear drives) on six coordinates (three translational and three rotational) characterizing the position of the mobile platform in space. The mathematical modeling of the RMP kinematics has been carried out. Data on the required linear and angular position of the mobile platform of the RMP, as well as the position of the rods and the speed of the rods of the drive mechanisms based on electric cylinders are selected as initial data for calculating the RMP control system. As a result of the simulation, a corresponding sample is obtained. The corresponding maximum and minimum values of the samples are obtained. These values correspond to the requirements for the minimum and maximum stroke of the rod of electric drives that drive the RMP. The results of mathematical modeling for a set of positional parameters of the RMP are presented. Numerical simulation of the optimization task is performed for the selected configuration of geometric parameters of the mobile platform of the RMP.

Keywords: platform, robotization, trajectory, configuration, hexapod, simulator, modeling, digitalization, design.

REFERENCES

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi: 10.1007/978-3-540-71990-8
2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.
3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042092
4. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E., Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. 10.1007/978-3-030-65739-0_3.
5. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi: 10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68
6. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi: 10.3103/S1052618815070122
7. Churin V.V. The use of computer simulators for training workers in road-building professions [Ispol'zovaniye komp'yuternykh trenazherov dlya podgotovki rabochikh dorozhno-stroitel'nykh professiy]. Young Scientist. 2011. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 28–29. (rus)
8. Belyakova A.V., Savelyev B.V. Analysis of information models of simulators for training drivers of vehicles (review) [Analiz informatsionnykh modeley trenazherov dlya obucheniya voditeley transportnykh sredstv (obzor)]. Bulletin of SibADI. 2019. No. 16 (5). Pp. 558–571. (rus)
9. Voronin A.V., Shpyakin I.K. Modeling the kinematic model of a hexapod in the MATLAB SIMULINK and CATIA software complexes [Modelirovaniye kinematicheskoy modeli geksapoda v programmnykh kompleksakh MATLAB SIMULINK i CATIA]. X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies" (November 13-14, 2012, Tomsk, Russia). 2012. Pp. 261–263. (rus)
10. Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Moroz A.V. A simulation model of a digital control system for a hexapod with linear drives based on stepper motors [Imitatsionnaya model' tsifrovoy sistemy upravleniya geksapodom s lineynymi privodami na baze shagovykh dvigateley]. Radio electronics issues. 2017. No. 7. Pp. 35–41. (rus)
11. Sapunov E.A., Proshin I.A. Simulation of the drive of the dynamic stand of the aviation simulator [Modelirovaniye privoda dinamicheskogo stenda aviatsionnogo trenazhera]. Aviation-Space Engineering. 2011. Pp. 337–340. (rus)

12. Zabazla I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator. Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.
13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures. ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7_23
14. Korotkov E.B., Matveev S.A., Yakovenko N.G. Ways to improve the quality indicators of the control system for a mechanism with a parallel structure (hexapod, tripod) based on Russian and world accessible electronic components [Puti povysheniya kachestvennykh pokazateley sistemy upravleniya mekhanizmom s parallel'noy strukturoy (geksapod, tripod) na baze rossiyskikh i mirovykh dostupnykh elektronnykh komponentov]. Questions of radio electronics. 2016. No. 8. Pp. 85–91. (rus)
15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy. Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi: 10.1007/s00170-007-1360-x
16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi: 10.1109/TRO.2004.833801
17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm. IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi: 10.1109/ICMA.2006.257695
18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process. Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169.
19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms. Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi: 10.1177/0954406212444508
20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms. CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14–17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99

Information about the authors

Bukharov, Kirill D. PhD, Leading researcher. E-mail: bukharovkd@gmail.com. Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9.

Grishin, Nikita A. Engineer. E-mail: grishin.na@phystech.edu. Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9.

Kudrov, Maksim A. PhD, Leading Researcher. E-mail: mkudrov@mail.ru. Moscow Institute of Physics and Technology Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy Lane, 9.

Rybak, Larisa A. DSc, Professor. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Cherkasov, Vladislav V. Research Engineer, Postgraduate student. E-mail: labbgtugos@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 4

Received 13.12.2021

Для цитирования:

Бухаров К.Д., Гришин Н.А., Кудров М.А., Рыбак Л.А., Черкасов В.В. Анализ кинематики шестистепенной роботизированной платформы подвижности испытательных стендов и тренажеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 81–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90

For citation:

Bukharov K.D., Grishin N.A., Kudrov M.A., Rybak L.A., Cherkasov V.V. Kinematics analysis of a 6-dof robotic mobility platform for test benches and simulators. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 81–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105

***Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И.,
Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nslubim@bk.ru

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С АДДИТИВНОЙ И СУБТРАКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Аннотация. Развитие аддитивного производства приводит к появлению новых технологий 3D печати, новым материалам для 3D печати и постепенному удешевлению производства. На сегодняшний день стоимость используемого для 3D печати металлом оборудования, а также материалы – металлические порошки, всё ещё остаются очень дорогими. Этот фактор делает не доступными эти технологии производства для гражданской машиностроительной промышленности при изготовлении функциональных деталей. Стоимость аддитивного производства металлических деталей в основном зависит от объёма печати, следовательно, снижение объёма печати, может привести к существенному снижению стоимости изготовления детали. Изготовление металлической оболочки, полость которой заполняется дешёвым металлополимером, может быть отличной альтернативой полностью металлической детали. Такая металл-металлополимерная композитная деталь может обладать достаточной прочностью, при этом существенно более низкой стоимостью. Однако для понимания экономической эффективности использования той или иной технологии производства, на сегодняшний день отсутствуют какие-либо зависимости. В статье приводится методика расчёта стоимости изготовления детали рычаг по различным технологиям: субтрактивным, аддитивным, технология изготовления композитной детали. По расчётным данным была построена зависимость стоимости изготовления детали от штучного времени которое можно интерпретировать как объём механической обработки. Построенная линейная зависимость может дать представление об эффективности применения той или иной технологии получения детали. Кроме того, описаны не экономические факторы влияющие на возможность применения различных технологических процессов изготовления детали. В совокупности представленные данные позволяют технологу комплексно оценить возможность эффективного применения той или иной технологии производства и принять соответствующее обоснованное решение.

Ключевые слова: металлополимер, механическая обработка, эффективность, штучное время, машиностроение, аддитивные технологии, композит, себестоимость.

Введение. В работах сотрудников Московского автомобильно-дорожного института [1, 2], применение полимерно-композиционных материалов (ПКМ) ставится в зависимость от применяемого наполнителя в полимерной матрице (ПМ), сравнительные данные приведены в таблице 1.

С точки зрения применения ПКМ в области машиностроения, то их чаще всего используют при изготовлении кузовных деталей, элементов отделки кабины и др. [1, 2]. Использование ПКМ с дисперсным наполнителем для изготовления деталей, испытывающих значительные нагрузки, практически не представлено в литературе. Это связано с тем, что вопросы применения ПКМ с дисперсными наполнителями малоизучены, отсутствует методика оценки эффективности применения ПКМ при изготовлении функциональных деталей машин. Кроме того, отсутствует технология и технологическое обеспечение для изготовления деталей машин из реактопластов. В

основном [4–6] представлены и описаны технологии литья термореактивных полимеров. Данная технология аналогична литью термопластичных полимеров. Суть этой технологии заключается в подаче из бункера гранул полимерной композиции в цилиндр, где под действием шнека или плунжера полимер подаётся в зону нагрева, где под действием токов высокой частоты происходит расплав полимера. Далее расплав впрыскивается в металлическую пресс-форму.

Применение таких дисперсно-наполненных ПКМ как металлополимеры, в промышленности часто ограничено ремонтными работами [7–9]. Однако металлополимеры, это реактопласты, обладающие для своего класса материалов уникальными свойствами. Среди уникальных свойств металлополимеров можно отметить прочность на сжатие до 230 МПа, прочность на растяжение до 60 МПа, Прочность на изгиб до 80 МПа, Модуль Юнга 6000 МПа [10]. Указанные свойства присущи отвержденному компаунду, но

до отверждения, металлополимерная смесь обладает высокими свойствами текучести, вязкость смеси достигает 25000 мПа·с. Некоторые свойства металлополимерных материалов приведены в таблице 2.

Согласно [3] объёмы производства изделий из ПКМ ежегодно увеличиваются (рис. 1).

Таблица 1

Сравнение ПКМ с различными типами наполнителей

Характеристики	ПКМ	
	Дисперсно-упрочненные	Армированные волокнистыми наполнителями
Роль матрицы	Несет основную нагрузку	Передаёт нагрузку на волокно
Роль наполнителя	Упрочняет матрицу. Степень упрочнения зависит от формы частиц наполнителя, их количества и распределения	Волокно несёт основную нагрузку при растяжении
Степень наполнения, масс. ч.	1...200	65...75
Коэффициент упрочнения (представляет собой отношение предела текучести ПМ к пределу текучести полимерной матрицы)	1,1...15	2...50
Прочность ПМ	Зависит от прочности полимерной матрицы и мало зависит от количества наполнителя	Зависит от прочности волокон, схемы армирования и изменяется пропорционально объёмному содержанию волокон
Свойства ПМ	Изотропные	Анизотропные
Области применения при ремонте машин	Устранение различных типов дефектов (раковин, трещин, коррозионных повреждений и пр.) в корпусных и кузовных деталях и агрегатах машин	Системы диагностирования. Устранение различных типов дефектов (раковин, трещин, коррозионных повреждений и пр.) в корпусных и кузовных деталях и агрегатах машин

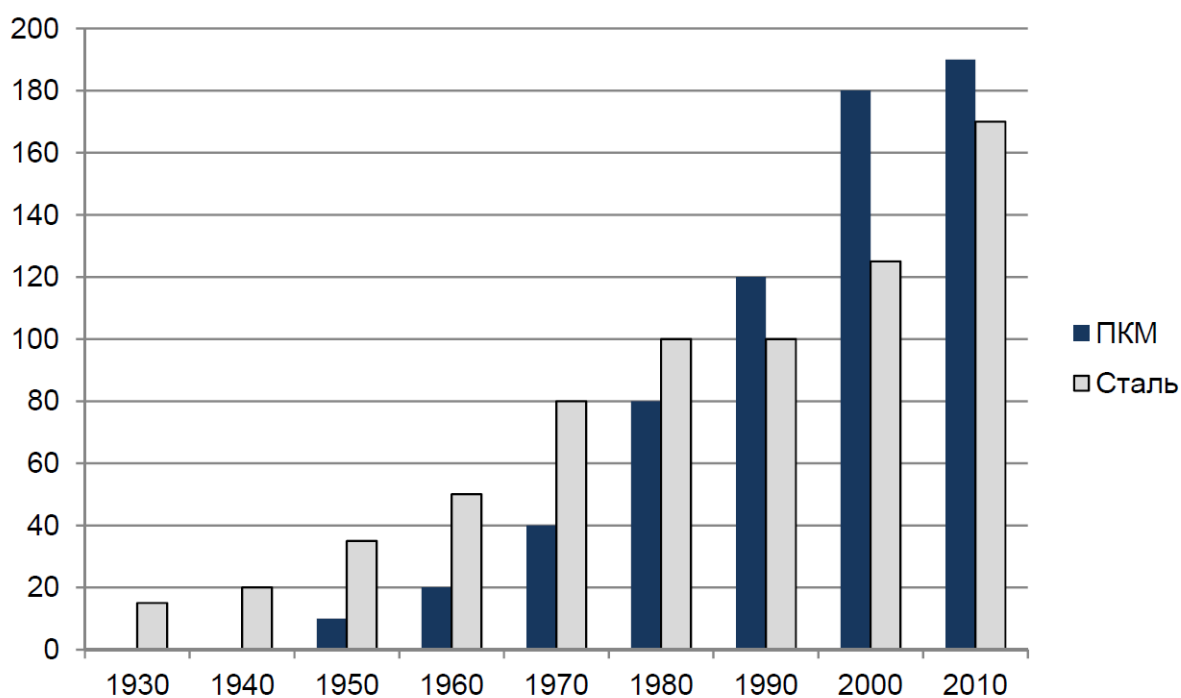


Рис. 1. Объёмы производства изделий из стали и ПКМ по годам, млн. м³

Таблица 2

Свойства металлополимерных материалов

Коммерческое название	Прочность на сжатие (DIN 53281-83), МПа	Прочность на растяжение (DIN 53281-83), МПа	Прочность на изгиб (DIN 53281-83), МПа	Вязкость смеси, МПа·с	Модуль Юнга, МПа
WEICON WR жидкий, наполненный сталью	110	33	80	20 000	5500
Devcon Plastic Steel Liquid (B)	70	–	–	25000	–
Металлополимер LEO «Ферро-хром»	230	–	76	–	6000
Loctite Hysol 3479	90	60	–	–	6000

Хотя изначально, производители металлополимеров указывают в своих рекомендациях по применению металлополимеров в качестве назначения ремонт и восстановление различных поверхностей технологического оборудования, изобретатели часто используют металлополимеры в качестве конструкционного материала для производства технологической оснастки [11–12]. В работах [13, 14] инженеры используют металлополимер для изготовления формообразующих поверхностей пресс-форм, так как металлополимер обладает достаточной прочностью и температуростойкостью, что обеспечивает необходимую стойкость оснастки. В дальнейшем, такая композитная оснастка, состоящая из металлической обоймы и металлополимерной формооб-

разующей части, используется для литья термопластов на термопластавтоматах или шприц-прессах.

На сегодняшний день проводятся научно-исследовательские работы [15, 16], по изучению возможности и созданию технологии и технологического обеспечения для изготовления композитных функциональных деталей. Суть изготовления композитной детали на основе металлополимера заключается в изготовлении тонкостенной оболочки при помощи аддитивных технологий с последующим заполнением такой оболочки металлополимерным ПКМ. На рис. 2 показана модель такой композитной детали, состоящей из металлополимерного заполнителя 1 и оболочки 2.

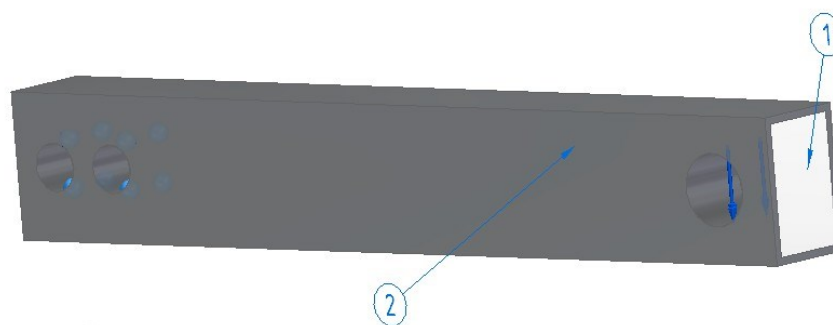


Рис. 2. Модель композитной детали: 1 – металлополимерный заполнитель; 2 – пустотелая оболочка

В работе [15, 16] приводятся исследования прочностных характеристик таких конструкций деталей. На рис. 3 показана диаграмма отражающая запас прочности деталей, изготовленных из чистых материалов, так если бы они были изготовлены полностью из металла или пластика на 3D принтере и композитных деталей, состоящих из металлической или пластиковой оболочки заполненной металлополимером.

Анализ диаграммы (рис. 3) показывает, что наиболее прочной остаётся деталь, изготовленная из металла. Композитная деталь, состоящая из металлической оболочки и металлополимерного заполнителя, так же обладает достаточной прочностью с запасом прочности в 3,75. Таким образом для заданных условий эксплуатации, как было описано в [16] (нагрузка на изгиб 2000 Н для рычага экзоскелета), использование композитной конструкции детали вполне приемлемо.

При этом если говорить об аддитивных технологиях изготовления, то стоимость изготовления рычага зависела бы только от объёма материала печати. Стоимость изготовления подобной де-

тали классическими технологиями с использованием механической обработки закладывало бы в себя стоимость материала, стоимость фонда оплаты труда, стоимость технологического обеспечения и др. расходы.

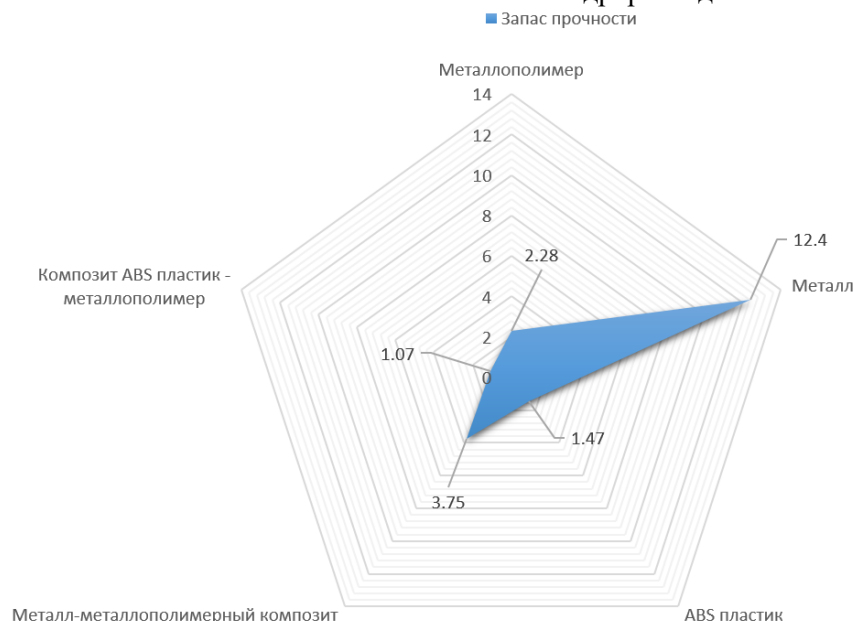


Рис. 3. Диаграмма запаса прочности композитных и цельных деталей

В данном исследовании приводятся расчёты на основе анализа стоимости изготовления рычага экзоскелета (по сути это может быть любая схожая по габаритам деталь) по технологии со снятием припуска в сопоставлении с технологией изготовления композитной детали на основе металлополимера. Анализируются и приводятся факторы влияющие на себестоимость изготовления детали по различным технологиям. Приводятся критерии эффективности применения технологии изготовления композитной детали.

Материалы и методы. Согласно теории машиностроения [17, 18], одним из основных параметров, влияющих на себестоимость изготовления изделия, является основное технологическое время изготовления изделия. Для понимания входящих в технологический процесс операций, приведём схемы технологических процессов для различных технологических процессов изготовления детали – рычаг (рис. 4).

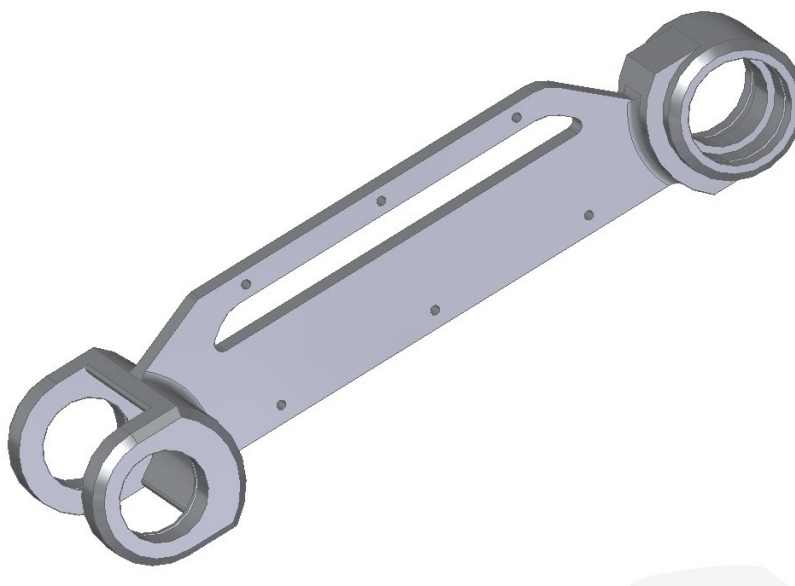


Рис. 4. Модель рычага.

На рис.4 представлена схема технологического процесса изготовления рычага путем снятия припуска с металлической заготовки.

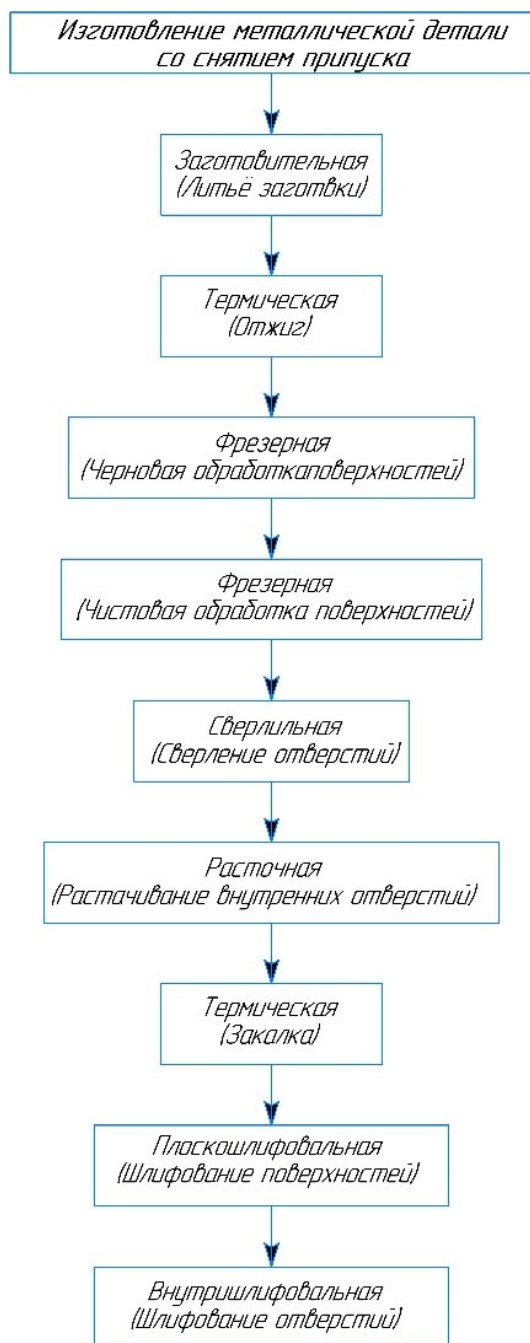


Рис. 5. Схема технологического процесса изготовления рычага из металла со снятием припуска

На рис. 6 показана схема технологического процесса получения детали рычаг с применением аддитивных технологий. В частности с использованием технологии SLM (Selective Laser Melting) [19–21].

На рис. 7 показана схема технологического процесса изготовления композитного рычага путем заполнения тонкостенной металлической оболочки изготовленной методом 3D печати металлом и заполненной металлополимером.

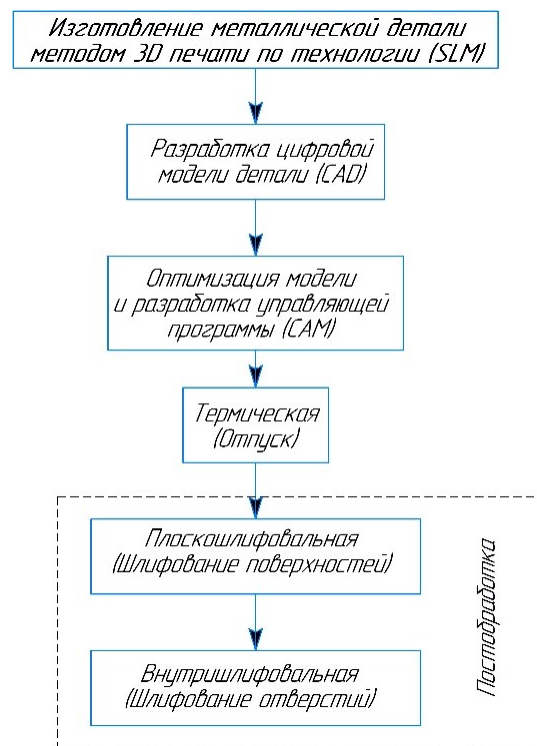


Рис. 6. Схема технологического процесса изготовления рычага из металла методом 3D печати (SLM)

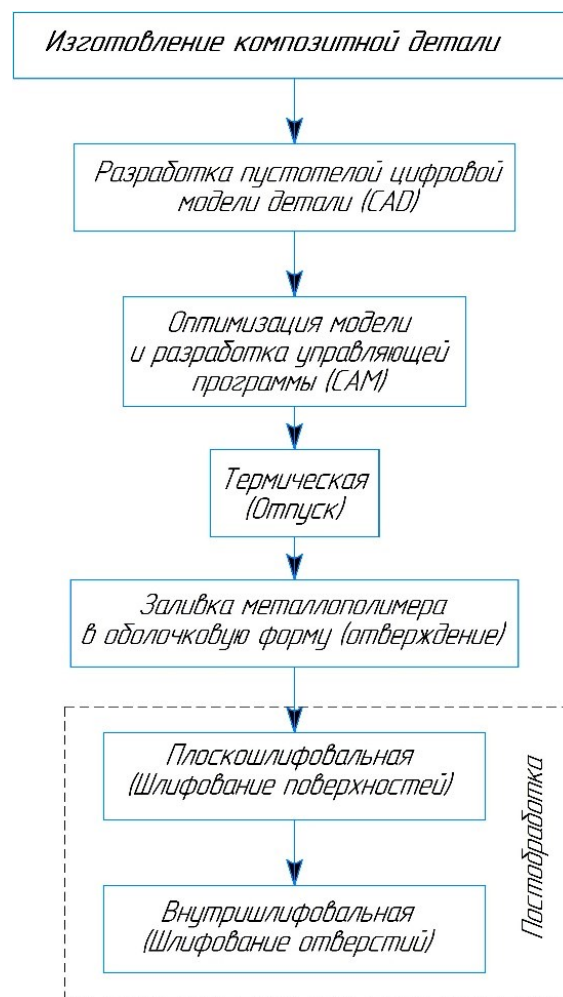


Рис. 7. Схема технологического процесса изготовления композитного рычага

Технико-экономическое сравнение технологических процессов произведем по технологической себестоимости изготовления детали:

$$C_T = M + Z + НР, \text{руб.} \quad (1)$$

где M – затраты на основные материалы без стоимости отходов с транспортно-заготовительными расходами;

Z – основная и дополнительная зарплата производственных рабочих с начислениями;

$НР$ – накладные расходы, состоящие из цеховых расходов, общезаводских, управленческих и внепроизводственных расходов.

Затраты на основные материалы для технологического процесса включающего механическую обработку резанием включают следующие показатели:

$$C_{MO} = \frac{C_p}{1000} \cdot M_z, \text{руб.} \quad (2)$$

где M_z – масса заготовки поковки для детали представленной на рис. 4 равняется 5,873 кг, а детали 5,339 кг;

C_p – стоимость 1 т металла марки 40Х13 ГОСТ 5632-72, на 15.01.2022 $C_p = 165000$ руб.

Стоимость отходов вычисляется по выражению:

$$C_{отх} = \frac{S_{отх}}{1000} \cdot (M_z - M_d), \text{руб.} \quad (3)$$

где, $S_{отх}$ – стоимость 1 т отходов [22], $S_{отх} = 3100$ руб.

Транспортно-заготовительные расходы принимаем по данным [22] в размере 2,2 % от стоимости заготовки.

Размер фонда оплаты труда (зарботная плата) производственных рабочих на соответствующую технологическую операцию рассчитывается по выражению:

$$Z = Z_o + Z_{доп} + Z_{нач}, \text{руб.} \quad (4)$$

где, Z_o – основная заработная плата с учетом 40 % премии при сдельно-премиальной системе оплаты, руб.

$$Z_o = 1,4 \frac{C_q \cdot T_{шк}}{60}, \text{руб.} \quad (5)$$

где, C_q – часовая тарифная ставка соответствующего разряда работы, руб;

$T_{шк}$ – штучно-калькуляционное время для данной операции, мин. ($T_{шк} = T_{ш} + T_{пз}/N$);

$T_{пз}$ – подготовительно-заключительное время на партию N обрабатываемых заготовок;

$Z_{доп}$ – дополнительная зарплата основных рабочих, т.е. оплата отпусков и т.д. ($Z_o \cdot 0,3$), руб.;

$Z_{нач} = 0,399(Z_o + Z_{доп})$, руб – начисление на зарплату по социальному страхованию – по данным ООО «Машиностроительный завод» 39,9 % от ($Z_o + Z_{доп}$).

Накладные расходы:

$$НР = ЦР + ОР + УР + ВР, \text{руб.} \quad (6)$$

где, $ЦР$ – цеховые расходы, принимаемые по данным ООО «Машиностроительный завод» в размере 224% от Z_o ;

$ОР$ – общезаводские расходы, принимаем в размере 162% от Z_o ;

$УР$ – управленческие расходы, принимаем в размере 50% от Z_o ;

$ВР$ – внепроизводственные расходы, принимаем равными 25% от ($M + Z_o + Z_{доп} + Z_{нач} + ЦР + ОР + УР$).

Основная часть. Произведём расчёты полной себестоимости изготовления детали «рычаг» (рис. 4) по трём технологическим процессам представленным на (рис. 5–7).

В таблице 3 приведены результаты расчетов заработной платы основных производственных рабочих для технологического процесса изготовления рычага из металлической заготовки путём снятия припуска (рис. 5). Расчетные данные приводятся из условия подготовительно-заключительного времени равного 32 минутам (по данным ООО «Машиностроительный завод»), а также размера партии изделий $N = 200$ шт.

Вариант изготовления детали по схеме технологического процесса изготовления рычага из металла со снятием припуска (рис. 5), предполагает получение заготовки методом литья или штамповки. Для расчета стоимости заготовки S используется выражение [22]:

$$S = \left(\frac{C_i}{1000} \cdot Q \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_N \right) - (Q - q) \cdot S_{отх}, \text{руб.} \quad (7)$$

где C_i – базовая стоимость одной тонны заготовок, руб./т;

Q – масса заготовки, кг;

q – масса детали, кг;

K_T – коэффициент, зависящий от класса точности;

K_C – коэффициент, зависящий от степени сложности;

K_B – коэффициент, зависящий от массы заготовки;

K_M – коэффициент, зависящий от марки материала;

K_N – коэффициент, зависящий от объёма выпуска заготовок.

Базовая стоимость одной тонны заготовок C_i принимается по данным предприятия потребителя заготовок, а коэффициенты входящие в уравнение (7) по таблицам [23]. Стоимость заготовки для детали «рычаг», по данным ООО «Машиностроительный завод» составляет $S = 754$ руб.

Таким образом полная стоимость металлической детали «рычаг», изготовленной по схеме технологического процесса со снятием припуска

составляет $C_T = 20157.4$ руб. Безусловно, расчётное значение отражает стоимость изготовления детали так, если бы всё предприятие, его персонал и оборудование было ориентировано на изготовление только одной детали «рычаг». На практике и основные фонды и персонал, задействованы в других производственных процессах, что снижает стоимость изделия. По данным ООО «Машиностроительный завод», полная стоимость C изделия рычаг составляет $C = C_T \cdot 0.2 = 4031.48$ руб.

Таблица 3

Заработная плата основных производственных рабочих для технологического процесса (рис. 5)

№ опер.	Наименование операции	Станок	Разряд	$C_{\text{ч}}$	$T_{\text{ш}}$	$T_{\text{шк}}$	Z_o	$Z_{\text{доп}}$	$Z_{\text{нач}}$
005	Фрезерная предварительная	Lupus 5X 100	5	256	32	32.2	192.1	57.6	99.6
010	Фрезерная чистовая	Lupus 5X 100	5	256	27	27.2	162.2	48.7	84.2
015	Сверлильная	ГФ2171С3	5	176	23	23.2	95.1	28.5	49.3
020	Расточная	BO 90 CNC	5	256	41	41.2	245.9	73.8	127.5
025	Термическая	Печь ТВЧ	5	156	300	300.2	1092.6	327.8	566.7
030	Плоскошлифовальная	HFS 40100 F Advance	4	256	47	47.2	281.7	84.5	146.1
035	Внутришлифовальная	RSM 500 B CNC	5	256	53	53.2	317.5	95.3	164.7
Итого:					523.0	524.1	2387.1	716.1	1238.2

Расчёт стоимости изготовления детали «рычаг» (рис. 4) методом 3D печати металлом. Согласно схеме технологического процесса представленной на рис. 6. Начинается с конструкторской подготовки, то есть с разработки 3D модели и её оптимизации для дальнейшего создания управляющей программы. В данном исследовании, с учётом сложности модели, затратами на конструкторскую подготовку можно пренебречь.

Термическая операция для снятия напряжений детали, после её спекания на 3D принтере, входит в стоимость аддитивного изготовления. В таблице 4 представлены данные о стоимости 3D печати металлом. Специфика аддитивного производства [19, 24], соотносит стоимость изготовления детали с её объёмом. То есть на стоимость изготовления влияет только объём печати.

Таблица 4

Данные о стоимости 3D печати детали из нержавеющей стали

Источник	Стоимость 1 см ³ , руб.
https://sprint3d.ru	967.79
https://www.cubicprints.ru	860.18
https://studia3d.com	1099.24
https://mg3d.ru	967.79
https://3d-made.com	1021.60
Средняя стоимость	983.17

На рис. 8 представлены массово-центровочные характеристики модели МЦХ детали «рычаг». Согласно данным рис. 8 объём детали равен 680 см³. Исходя из стоимости 3D печати (табл. 3) и объёма модели, не сложно посчитать, что стоимость изготовления детали «рычаг», будет составлять 668553 руб. Очевидно, что изготовление

детали «рычаг», экономически не обосновано с использованием технологий аддитивной печати металлом. Для снижения стоимости 3D печати, производят оптимизацию стоимости формы изделия применяя генеративный дизайн [25]. Генеративный дизайн позволяет убрать часть материала из модели формы, который не задействуется

в работе изделия и передаче нагрузок. Тем не менее даже оптимизация формы изделия путём генеративного дизайна не позволяет существенно снизить объём материала, что сказывается и на цене изготавливаемой детали. Обычно, 3D печать используется для изготовления деталей

сложной формы, когда изготовление детали другими методами, не представляется возможным или существуют строгие временные ограничения. 3D печать позволяет изготовить деталь без организации сложной подготовки производства и разработки технологического обеспечения, что сокращает время изготовления.



Рис. 8. Массово-центровочные характеристики детали «рычаг»

Изготовление композитной детали в соответствии с схемой технологического процесса представленного на рис.7, предполагает аддитивное изготовление пустотелой оболочки и заполнение её металлополимером.

Металлическая оболочка изготавливается путём её печати на 3D принтере и служит не только для придания формы изделия, но и несет функциональное назначение. Так как не смотря на заполнение тела изделия металлополимером для придания ему прочностных свойств, необходимо обеспечить требуемые свойства рабочих поверхностей, например, поверхностей под посадку подшипников, плоскостей примыкания детали к другим сборочным единицам и т.д. Другими словами необходимо обеспечить требуемые размерные и качественные (шероховатость поверхности) свойства детали. Прочностные свойства рабочих поверхностей при этом будут задаваться материалом 3D печати.

Стоимость 1 см³ металлополимера наполненного нержавеющей сталью [26], по данным производителя составляет 6.61 руб.

На рис. 9 показан разрез тонкостенной модели рычага и её МЦХ. Тонкостенная модель рычага, с толщиной стенки 1 мм, имеет объём равный 140 см³, что на 540 см³ меньше чем у полнотелой детали. В стоимостном выражении аддитивного производства, это на 530911 руб. меньше аддитивное производства полнотелой детали. Стоимость аддитивного изготовления оболочки из металла равняется 137620 руб.

При этом как для полностью напечатанной детали на 3D принтере из металла, так и для композитной детали, требуется финишная обработка рабочих поверхностей, для придания им требуемых качественных и размерных характеристик. В целом из-за достигаемого 3D печатью качества поверхности [27], соответствующего допуску размерной точности 20-150 мкм и шероховатости поверхности Ra 3.8-15 мкм, требуется постобработка. При изготовлении композитной детали рис. 7 постобработка включает операции плоского и внутреннего шлифования.

Стоимость механической обработки для композитной детали (операции шлифования), будут включать только стоимость фонда заработной платы и накладных расходов, а также понижающего коэффициента 0.2. Стоимость шлифовальной обработки детали «рычаг» будет равняться 950 руб.

Полная стоимость изготовления композитной детали «рычаг» будет состоять из стоимости изготовления оболочки равной 137620 руб., стоимости шлифовальной обработки 950 руб., кроме

того в стоимость изготовления входит стоимость операции заливки металлополимера. Стоимость операции заливки металлополимером тонкостенной оболочки включает стоимость фонда заработной платы на операцию, равного 46 руб. А также стоимость металлополимерной композиции. Для детали рычаг потребуется 540 см^3 металлополимера, по стоимости 6.61 руб/см^3 , то есть на всю деталь 3569.4 руб.

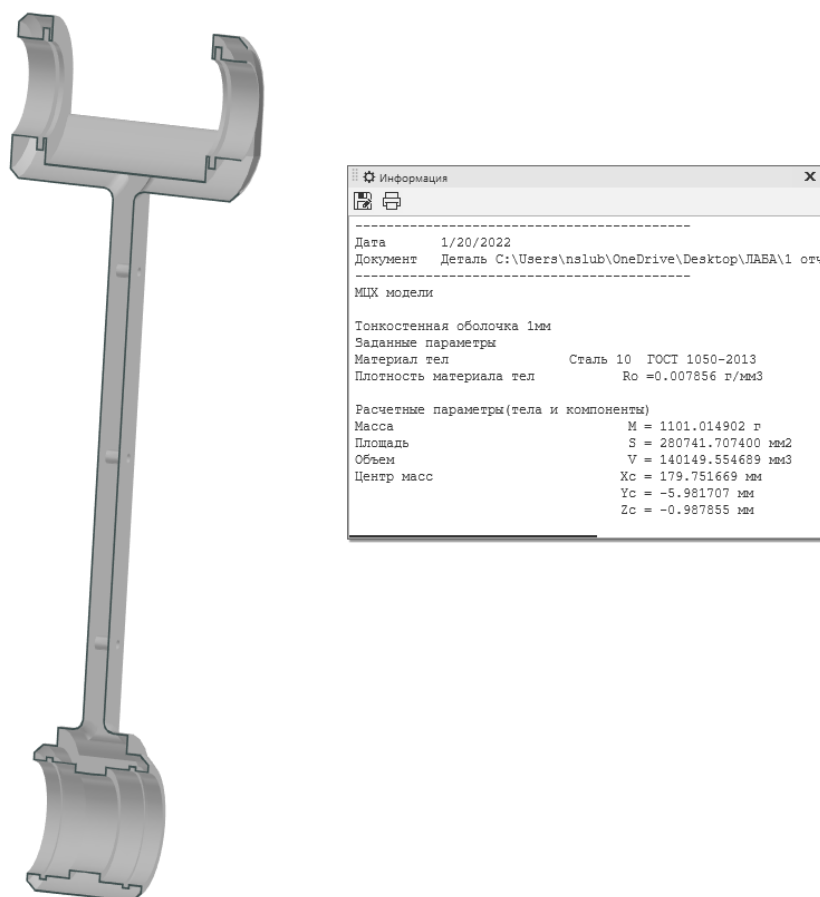


Рис. 9. Массово-центровочные характеристики пустотелой детали «рычаг» с толщиной стенки 1 мм

Выводы. В исследовании представлены расчёты стоимости изготовления детали «рычаг» по 3 технологическим процессам. Расчёты показывают, что изготовление детали путём механической обработки металлической заготовки по стоимости соответствует 20157.4 руб. за 1 единицу изделия. При этом стоимость изготовления существенно зависит от размера партии, а также объёма механической обработки.

Усреднив значения размера стоимости оплаты труда по различным операциям и поставив стоимость механической обработки в зависимости от штучного времени, можно рассчитать зависимость технологической себестоимости детали C_T , от штучного времени изготовления детали.

Технологическая себестоимость изделия, полностью напечатанного на 3D принтере из металла, будет зависеть от объёма печати. Кроме того, для выбора технологии аддитивного производства при изготовлении детали, немаловажным будет фактор технологического времени на процесс 3D печати. По данным [28] время изготовления детали «рычаг» на 3D принтере в зависимости от объёма печати составило бы 1440 мин., а изготовление пустотелой оболочки 296 мин.

Время изготовления и технологическая себестоимость изготовления композитной детали, с учётом постобработки, составляют 402 мин и 142186 руб.

На рис. 10 показаны области эффективного использования различных технологий получения

детали по критерию технологической себестоимости.

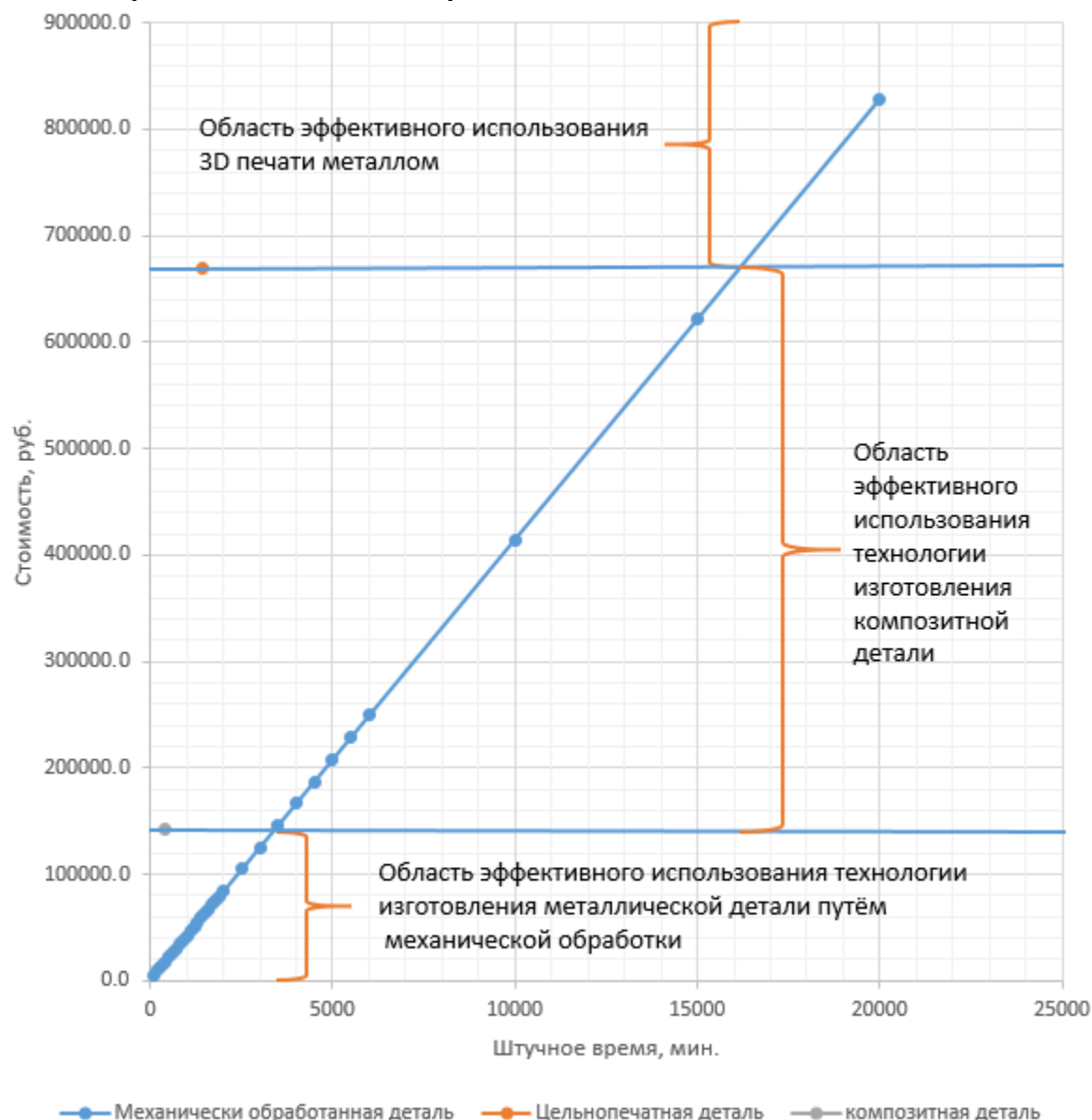


Рис. 10. Сопоставление стоимости изготовления детали по различным технологиям: технология механической обработки, печать цельной детали на 3D принтере, изготовление композитной детали.

Для принятия решения об использовании той или иной технологии изготовления детали, инженеру технологу необходимо учитывать не только технологическую себестоимость (рис. 10), но и другие параметры. К таким параметрам относятся следующие параметры:

- прочность детали, которая будет различной для каждой детали, изготовленной по той или иной технологии. В зависимости от служебного назначения, необходимо производить прочностные расчёты (например, с использованием метода конечных элементов МКЭ), для определения запаса прочности детали, изготовленной по различным технологиям;
- имеющееся технологическое обеспечение и оборудование. К такому оборудованию относится доступ к парку станочного оборудования, имеющаяся технологическая оснастка и инструмент;
- размер партии и серийность производства. Серийность производства оказывает сильное влияние на стоимость подготовки производства, стоимость технологического обеспечения, а также технологических приспособлений;
- допустимое время производства. Если говорить о производстве новых деталей, то влияние времени производства выражается в большей степени на фонде заработной платы. Но что делать, когда время производства детали влияет на

работоспособность машины или комплекса машин, как в случае ремонтного производства. В случае, когда необходимо произвести деталь для ремонта технологического оборудования, иногда стоимость производства детали имеет второстепенную роль, нежели скорость производства, так как простой оборудования может нанести куда более существенный негативный экономический эффект, нежели потери от увеличения стоимости изготовления детали необходимой для ремонта этого оборудования;

- сложность геометрической формы детали. Служебное назначение детали, требования к её массе, форме, эргономике так же оказывают существенное влияние на выбор технологии производства. Например, применение аддитивных технологий, часто используют в случаях, когда форма детали имеет сложную структуру и геометрию. Наличие криволинейных полостей, внутренних каналов, тонких стенок и пр. Кроме того акцент к применению аддитивных технологий смещается, если происходит восстановление детали по цифровой модели, полученной 3D сканированием, то есть когда отсутствует чертёж детали.

Полученные данные и приведенная расчётная методика позволяет в комплексе с учётом других параметров, принять решение об эффективности использования той или иной технологии получения детали.

Приведенные расчётные данные не отражают расчёта получения композитной детали, где в качестве материала оболочки использовался бы пластик, а заполнение её производилось бы металлополимерным составом. Такая композитная деталь пластик – металлополимер, была бы очень дешёвой, так как стоимость 3D печати пластиком не высока, как и материал заполнения – металлополимер. Однако эта технология ограничена в сферах применения в первую очередь прочностными свойствами как самой детали, так и рабочих поверхностей. Кроме того, связь реологических свойств металлополимера при заполнении тонкостенной формы и её геометрии так же накладывает ряд ограничений на изготовление такой композитной детали и требует дополнительных научно-экспериментальных изысканий в области технологического обеспечения.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет научного проекта № МЛ-6/21 от 22.11.21 г. по теме: «Повышение эффективности процесса получения деталей строительных машин из композитных материалов, за счёт применения топологической оптимизации формы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учебное пособие. М.: МАДИ. 2016. 264 С.
2. Баурова Н.И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов: монография. М.: ТехПолиграфЦентр, 2008. 280 с.
3. Андреева А.В. Основы физикохимии и технологии композитов: учеб. пособие. М.: ИПРЖР, 2001. 192 с.
4. Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. 3-е испр. изд. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
5. Зорин В.А., Баурова Н.И. Ремонт теплонагруженных элементов машин и оборудования с использованием наполненных полимерных материалов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 4. С. 16–18.
6. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Тетерина И.С. Обработка комбинированной металл-металлополимерной плоской поверхности детали пресс-формы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 119–123.
7. Bytsenko O.A., Bessonova N.A., Dzhafarov E.E., Tishkov V.V., Gnevashev D.A. Production of technological plugs for engine box and oil system using additive technologies // INCAS Bull. 2021. Vol. 13. Pp. 21–27. doi:10.13111/2066-8201.2021.13.S.3.
8. Palka D. Use of Reverse Engineering and Additive Printing in the Reconstruction of Gears // Multidiscip. Asp. Prod. Eng. 2020. Vol. 3. P. 48–57. doi:10.2478/mape-2020-0024.
9. Зорин В.А., Баурова Н.И. Повышение стойкости полимерных материалов, применяемых при ремонте машин, к воздействию циклических нагрузок // Механизация строительства. 2013. № 4 (826). С. 25–27.
10. Металлополимеры «ЛЕО». М.: Изд-во «ЗАО Металлополимерные материалы ЛЕО», 2013. 33 с.
11. Зленко М.А., Забеднов П.В. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм // Металлургия машиностроения. 2013. №3. С. 12–18.
12. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. № 3. С. 24–42.
13. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы. СПб.: Профессия, 2007. 614 с.

14. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds // UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.
15. Lubimyi N., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13. doi:10.1080/14484846.2020.1786654
16. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures // Polymers 2022. 14. 352. doi:10.3390/polym14020352
17. Дальский А.М. Технология машиностроения: учеб. для вузов: в 2 т. Т.1: Основы технологии машиностроения. 2-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. 562 с.
18. Дальский А.М., Суслов А.Г., Назаров Ю.Ф. Энциклопедия. Технология изготовления деталей машин Т. III-3. М. Машиностроение, 2000. 839 с.
19. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // Eng. Struct. 2019. Vol. 180. Pp. 332–348. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.045
20. Tian C., Li X., Li H., Guo G., Wang L., Rong Y. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM) // Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 743. Pp. 697–706. doi:10.1016/j.msea.2018.11.138.
21. Wang H.-Y., Lo Y.-L., Tran H.-C., Raza M.M., Le T.-N. Systematic approach for reducing micro-crack formation in Inconel 713LC components fabricated by laser powder bed fusion. // Rapid Prototyp. J. 2021. Vol. 27. Pp. 1548–1561. doi:10.1108/RPJ-11-2020-0282.
22. Шодиев З. О., Хамроев Х.Х., Шодиев А.З., Хамроев Б.Х. Расчет стоимости получения заготовки различными методами // Молодой ученый. 2017. № 12 (146). С. 96-97.
23. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. Справочник технолога машиностроителя: в 2-х т. М.: Машиностроение, 2001. Т.1. 914 с.
24. Ryabikina M.A. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. // Report. Priazovskyi State Tech. Univ. Sect. Tech. Sci. 2019. Vol. 38. Pp. 45–52
25. Khan S., Gunpinar E., Moriguchi M., Suzuki H. Evolving a psycho-physical distance metric for generative design exploration of diverse shapes // Journal of Mechanical Design. 2019. Vol. 141. Pp. 1–16. doi:10.1115/1.4043678
26. Металлополимерные материалы «ЛЕО» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leopolimer.ru/Price.htm> (дата обращения: 23.01.2022)
27. Проектирование под 3D-печать металлом, DMLM и DMLS [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/proektirovanie-pod-3d-pechat-metallom-dmlm-i-dmls.html> (дата обращения: 23.01.2022)
28. Haleem A., Javaid M. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing // Clin. Epidemiol. Glob. Heal. 2020. Vol. 8. Pp. 215–223. doi:10.1016/j.cegh.2019.08.002.

Информация об авторах

Любимый Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Польшин Андрей Александрович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Тихонов Александр Андреевич, магистрант. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Герасимов Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Мелентьев Никита Андреевич, студент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: sancesnik1@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 30.01.2022 г.

© Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А., 2022

**Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tikhonov A. A., Antsiferov S.I., Gerasimov M.D.,
Melentiev N.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: nslubim@bk.ru*

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPOSITE METAL-METAL-POLYMER PARTS IN COMPARISON WITH ADDITIVE AND SUBTRACTIVE TECHNOLOGIES

Abstract. *The development of additive manufacturing leads to the emergence of new 3D printing technologies, new materials for 3D printing and a gradual reduction in the cost of production. Nowadays, the cost of equipment used for metal and metal powders 3D printing are still very expensive. This factor makes the production technologies unavailable for the civil engineering industry in the manufacture of functional parts. The cost of additive manufacturing of metal parts is mainly dependent on the volume of printing. Reducing the print volume can lead to a significant reduction in the cost of manufacturing the part. Fabrication of a metal shell, the cavity of which is filled with a cheap metal polymer, can be an excellent alternative to an all-metal part. Such a metal-metal-polymer composite part can have sufficient strength and significantly lower cost. However, there are no dependencies today to understand the economic efficiency of using a particular production technology. The article provides a method for calculating the cost of manufacturing a lever part using various technologies: subtractive, additive and composite part manufacturing technology. According to the calculated data, the dependence of the cost of manufacturing a part on piece time is built. It can be interpreted as the amount of machining. The constructed linear dependence can give an idea of the effectiveness of the application of a particular technology for obtaining a part. In addition, non-economic factors affecting the possibility of using various technological processes for manufacturing a part are described. Together, the presented data allow the technologist to comprehensively assess the possibility of effective application of a particular production technology and make an appropriate informed decision.*

Keywords: *metal polymer, mechanical processing, efficiency, piece time, mechanical engineering, additive technologies, composite, prime cost*

REFERENCES

1. Baurova N.I., Zorin V.A. The use of polymeric materials in the manufacture and repair of machines [Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin]. M.: MARI, 2016. 264 p. (rus)
2. Baurova N.I. Diagnostics and repair of machines using polymeric materials [Diagnostirovanie i remont mashin s primeneniem polimernykh materialov]. M.: TechPolygraphCenter, 2008. 280 p. (rus)
3. Andreeva A.V. Fundamentals of physical chemistry and technology of composites [Osnovy fizikohimii i tekhnologii kompozitov]. M.: IPRGR, 2001. 192 p. (rus)
4. Berlin A.A. Polymer composite materials: structure, properties, technology: textbook [Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobie]. St. Petersburg: TsOP "Professiya". 2011. 560 p.
5. Zorin V.A., Baurova N.I. Repair of heat-loaded elements of machines and equipment using food polymer materials [Remont teplonagruzhenykh elementov mashin i oborudovaniya s ispol'zovaniem napolnennykh polimernykh materialov]. Repair, restoration, modernization. 2013. No. 4. Pp. 16–18. (rus)
6. Lubimiy N.S., Chepchurov M.S., Teterina I.S. Processing of a combined metal-metal-polymer flat surface of a mold part [Obrabotka kombinirovannoy metall-metallopolimernoy ploskoj poverhnosti detali press-formy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 6. Pp. 119–123.
7. Bytsenko O.A.; Bessonova N.A., Dzhaferov E.E., Tishkov V.V., Gnevashev D.A., Production of technological plugs for engine box and oil system using additive technologies. INCAS Bull. 2021. Vol. 13. Pp. 21–27. doi:10.13111/2066-8201.2021.13.S.3.
8. Palka D. Use of Reverse Engineering and Additive Printing in the Reconstruction of Gears. Multidiscip. Asp. Prod. Eng. 2020. Vol. 3. Pp. 48-57. doi:10.2478/mape-2020-0024.
9. Zorin V.A., Baurova N.I. Improving the resistance of polymeric materials used in the repair of machines to the effects of cyclic loads [Povyshenie

stojkosti polimernykh materialov, primenyaemykh pri remonte mashin, k vozdeystviyu ciklicheskih nagruzok]. Mechanization of construction. 2013. No. 4 (826). Pp. 25–27.

10. Metal polymers "LEO". M.: Publishing house "ZAO Metal-polymer materials LEO". 2013. 33 p.

11. Zlenko M.A., Zabednov P.V. Additive technologies in pilot foundry. Casting of metals and plastics using synthesis models and synthesis forms [Additivnye tekhnologii v opytном litejnom proizvodstve. Lit'e metallov i plastmass s ispol'zovaniem sintez-modelej i sintez-form]. Metallurgy of mechanical engineering. 2013. No.3. Pp. 12–18.

12. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials [Perspektivy ispol'zovaniya uglerodsoderzhashchih nanochastich v svyazuyushchih dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov]. Russian nanotechnologies. 2013. No. 3. Pp. 24–42.

13. Menges G., Michaeli V., Moren P. How to make injection molds [Kak delat' lit'evye formy] St. Petersburg: Profession, 2007. 614 p.

14. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds. UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.

15. Lubimyi N., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part. Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. P. 1–13. doi:10.1080/14484846.2020.1786654

16. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures. Polymers 2022. Vol. 14. Iss. 352. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym14020352>

17. Dalsky A. M. et al. Engineering technology: textbook. for universities: in 2 volumes. V.1: Fundamentals of mechanical engineering technology [Tekhnologiya mashinostroeniya: ucheb. dlya vuzov: v 2 t. T.1: Osnovy tekhnologii mashinostroeniya]. 2nd ed., ster. M.: Publishing house of MSTU named N. E. Bauman, 2001. 562 p.

18. Dalsky A.M., Suslov A.M., Nazarov Yu.F. et al. Encyclopedia. Manufacturing technology of machine parts T. III-3 [Enciklopediya. Tekhnologiya

izgotovleniya detalej mashin]. M. Mashinostroenie, 2000. 839 p.

19. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. Eng. Struct. 2019. Vol. 180. Pp. 332–348. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.045

20. Tian C., Li X., Li H., Guo G., Wang L., Rong Y. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM). Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 743. Pp. 697–706. doi:10.1016/j.msea.2018.11.138.

21. Wang H.-Y., Lo Y.-L., Tran H.-C., Raza M.M., Le T.-N. Systematic approach for reducing micro-crack formation in Inconel 713LC components fabricated by laser powder bed fusion. Rapid Prototyp. J. 2021. Vol. 27. Pp. 1548–1561. doi:10.1108/RPJ-11-2020-0282.

22. Shodiev Z.O., Khamroev Kh.Kh., Shodiev A.Z., Khamroev B.Kh. Calculation of the cost of obtaining a workpiece by various methods [Raschet stoimosti polucheniya zagotovki razlichnymi metodami]. Young scientist. 2017. No. 12 (146). Pp. 96–97.

23. Dalsky A.M., Kosilova R.K., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G. Handbook of a machine builder technologist: in 2 volumes [Spravochnik tekhnologa mashinostroytelya]. M.: Mashinostroenie. 2001. Vol.1. 914 p.

24. Ryabikina M.A. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. Report. Priazovskiy State Tech. Univ. Sect. Tech. Sci. 2019. Vol. 38. Pp. 45–52.

25. Khan S., Gunpinar E., Moriguchi M., Suzuki H. Evolving a psycho-physical distance metric for generative design exploration of diverse shapes. Journal of Mechanical Design. 2019. Vol. 141. Pp. 1–16. DOI:10.1115/1.4043678

26. Metal-polymer materials "LEO". URL: <http://www.leopolimer.ru/Price.htm> (date of treatment: 23.01.2022)

27. Design for 3D printing with metal, DMLM and DMLS [Proektirovanie pod 3D-pechat' metallom, DMLM i DMLS] URL: <https://top3dshop.ru/blog/proektirovanie-pod-3d-pechat-metallom-dmlm-i-dmls.html> (date of treatment: 23.01.2022)

28. Haleem A., Javaid M. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing. Clin. Epidemiol. Glob. Heal. 2020. Vol. 8. Pp. 215–223. doi:10.1016/j.cegh.2019.08.002.

Information about the authors

Lubimyi, Nikolai S. Ph.D. in engineering, Associate Professor. E-mail: nslubim@bk.ru Belgorod State Technological University. Named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Polshin, Andrey A. Postgraduate student. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Tikhonov, Aleksandr A. Master's student. E-mail: cherep2240@rambler.ru Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Gerasimov, Mikhail D. PhD, Associate Professor. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Melentiev, Nikita A. Student. E-mail: sancesnik1@gmail.com. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 30.01.2022

Для цитирования:

Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А. Оценка экономической эффективности технологии изготовления композитных металл-металлополимерных деталей в сравнении с аддитивной и субтрактивной технологиями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 91–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105

For citation:

Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tikhonov A. A., Antsiferov S.I., Gerasimov M.D., Melentiev N.A. Evaluation of the economic efficiency of the technology for manufacturing composite metal-metal-polymer parts in comparison with additive and subtractive technologies. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 91–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105