

Научно-теоретический журнал  
**ВЕСТНИК**

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

**4**

**2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. В.Г. ШУХОВА

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

**№ 4, 2021 год**

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

**Vol. 4. 2021**

# 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:

- 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 05.23.20 – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия(архитектура)
- 05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	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.
<b>Учредитель/Издатель:</b>	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
<b>Адрес редакции:</b>	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
<b>Адрес типографии:</b>	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
<b>Тел:</b>	+7 (4722) 30-99-77
<b>E-mail:</b>	VESTNIK@intbel.ru
<b>Официальный сайт журнала:</b>	<a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>
<b>Подписка и распространение</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. Online подписка: <a href="http://www.akc.ru/itm/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a> Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	28.04.2021
<b>Выход в свет</b>	17.05.2021

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 11,63. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 40 экз. Заказ № 43

# 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:

- 05.23.01** – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 05.23.03** – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 05.23.05** – Building materials and products (technical sciences)
- 05.23.20** – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers – recognized experts in the relevant branch of knowledge. Copies of reviews or motivated refusal in the publication are provided to the authors and to the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (on request). Reviews are stored in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright, plagiarism and slander, and the ethical principles maintained by the international community of the leading publishers of the scientific periodical press and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

<b>Founder / Publisher:</b>	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
<b>Editorial office address:</b>	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
<b>Printing house address:</b>	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
<b>Tel:</b>	+7 (4722) 30-99-77
<b>E-mail:</b>	VESTNIK@intbel.ru
<b>Official website of the journal</b>	<a href="https://bulletinbstu.editorum.ru">https://bulletinbstu.editorum.ru</a>
<b>Подписка и распространение</b>	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: <a href="http://www.akc.ru/itm/2558104627/">http://www.akc.ru/itm/2558104627/</a>
<b>Signed for printing:</b>	28.04.2021

**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).

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

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

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

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

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

**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., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

**Пивинский Юрий Ефимович**, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГНЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

**Потанов 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 хозяйства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

**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).

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

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

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

**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. Davidiyuk**, 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, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (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

<b>Логанина В.И., Зайцева М.В.</b> К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА БЕТОНА	8
<b>Крушельницкая Е.А.</b> ОЦЕНКА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ БЕТОНА	13
<b>Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И.</b> ОДЕЖДА ЕЗДОВОГО ПОЛОТНА МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ	21
<b>Еремкин А.И., Пономарева И.К., Трофимов Д.А.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНЫХ УСЛОВИЙ И СОХРАННОСТИ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ	36
<b>Хербез В.</b> О ФОРМИРОВАНИИ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ В УСЛОВИЯХ ИСТОРИКО-ПРИРОДНЫХ ЗАПОВЕДНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ СКАДАРСКОГО ОЗЕРА В ЧЕРНОГОРИИ)	46
<b>Банцорова О.Л., Садыкова С.Ш., Касимова А.Р.</b> ПРОБЛЕМЫ ВОЗРОЖДЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ СЕЛЬСКОГО ЖИЛИЩА РОССИЙСКО-КАЗАХСТАНСКОГО ПРИГРАНИЧЬЯ	53
<b>Золотарева М.В., Гранстрем М.А., Никитин Ю.А.</b> К БИОГРАФИИ ГРАЖДАНСКОГО ИНЖЕНЕРА П. О. САЛЬМАНОВИЧА	66

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<b>Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРАТАЦИИ ТРЕХКАЛЬЦИЕВОГО СИЛИКАТА	75
<b>Фанина Е.А.</b> ЭФФЕКТИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА	82

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Дююн И.А., Чуев К.В.</b> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	91
--	----

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<b>Loganina V.I., Zaytceva M.V.</b> TO THE QUESTION OF CONCRETE QUALITY CONTROL	8
<b>Krushelnitskaya E.A.</b> EVALUATION OF PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF CONCRETE	13
<b>Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V., Kuznetsov D.A., Tkacheva A.I.</b> ROAD SURFACE OF THE PAVEMENT COATING BRIDGE	21
<b>Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Trofimov D.A.</b> IMPROVEMENT OF CLIMATE SUPPLY SYSTEMS OF COMFORT AND PRESERVATION OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE IN ORTHODOX CULTURAL FACILITIES	36
<b>Herbez V.</b> ON THE FORMATION OF TOURIST AND RECREATION CLUSTERS IN THE CONDITIONS OF HISTORICAL AND NATURAL RESERVES (ON THE EXAMPLE OF LAKE SKADAR IN MONTENEGRO)	46
<b>Bantserova O.L., Sadykova S.S., Kasimova A.R.</b> PROBLEMS OF REVIVAL OF NATIONAL FEATURES IN MODERN ARCHITECTURE OF RURAL DWELLING OF RUSSIAN-KAZAKH BORDER AREA	53
<b>Zolotareva M.V., Granstrom M.A., Nikitin Yu.A.</b> TO THE BIOGRAPHY OF THE CIVIL ENGINEER P.O. SALMANOVICH	66

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<b>Rahimbaev S. M., Onoprienko N. N., Salnickowa O.N.</b> THERMODYNAMIC ANALYSIS OF TRICALCIUM SILICATE HYDRATION	75
<b>Fanina E.A.</b> EFFICIENT ACOUSTIC COMPOSITE PANELS BASED ON GRAPHITE	82

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Duyun I.A., Chuev K.V.</b> ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS AND ROBOTIC COMPLEXES USING SIMULATION	91
--	----

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-12

\*Логанина В.И., Зайцева М.В.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

\*E-mail: loganin@mail.ru

## К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА БЕТОНА

**Аннотация.** В статье приведены сведения о результатах оценки качества бетона внутренних стеновых панелей. Рассмотрены требования различных нормативных документов к правилам приемки партии бетона. Описана процедура статистического выборочного контроля по количественному признаку. По статистическим данным заводской лаборатории ОАО «Завод ЖБК-1» (г. Пенза) о качестве бетона марки 300 при изготовлении внутренних стеновых панелей рассмотрено влияние вида цемента на вариабельность показателей прочности бетона. Установлено влияние вида цемента на решение о приемке партии бетона. Вследствие более высокого значения среднеквадратического отклонения показателей качества цемента Хальденберг по сравнению с Сенгилеевским цементом принятие партии бетона зависит от уровня дефектности продукции. Выявлено, что в зависимости от числа образцов при испытании решение о приемке партии, выполненное в соответствии с ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ Р ИСО 12491-2011, может быть различным. Предложено внести коррективы в ГОСТ 10180-2012 в пункт 4 в части количества образцов для испытаний с учетом требований ГОСТ Р ИСО 12491. Это будет способствовать более объективному решению о приемке партии. Показано влияние вида цемента на воспроизводимость процесса производства.

**Ключевые слова:** бетон, правила контроля, количество образцов, вероятность, прочность, стандартное отклонение, воспроизводимость.

**Введение.** Производственный контроль является одним из элементов управления качеством выпускаемой продукции. Он включает входной контроль сырья, операционный контроль и приемочный контроль качества изделий [1–3]. В процессе контроля осуществляется сопоставление результатов оценки качества с допуском, указанным в нормативной документации [4–6]. Система контроля позволяет в большинстве случаев предотвратить брак. Основными целями контроля качества являются обеспечение выпуска предприятием качественной продукции. Одной из актуальных проблем контроля является обеспечение достоверности. Достоверность контроля есть степень доверия к принимаемым решениям. В качестве показателя достоверности используется вероятность принятия правильного решения по результатам контроля.

Однако, учитывая вариабельность показателей качества продукции, решение о приемке партии может быть ложным. В настоящее время существуют несколько стандартов, регламентирующих правила проведения приемочного контроля строительных материалов и изделий. Основные положения по проведению испытаний и приемки продукции серийного производства устанавливает ГОСТ 15.309-98 «Система разработки и постановки продукции на производство. Испытание и приемка выпускаемой продукции. Основные положения». Правила по организации,

проведению и оформлению результатов входного контроля устанавливает ГОСТ 24297-87.

ГОСТ 18105-2018 устанавливает правила проведения приемочного контроля партии бетона. Если прочность бетона в партии  $R$  не ниже требуемой прочности  $R_t$ , а минимальное единичное значение прочности  $R_{min}$  не менее нормируемого класса бетона по прочности  $B$

$$R \geq R_t, \quad (1)$$

$$R_{min} \geq B, \quad (2)$$

то партия бетонной смеси подлежит приемке.

Число образцов для испытаний в зависимости от среднего внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона составляет от 2 до 6.

ГОСТ Р ИСО/ТО 8550-3-2008 «Статистические методы. Руководство по выбору и применению систем статистического приемочного контроля дискретных единиц продукции в партиях. Часть 3. Выборочный контроль по количественному признаку» регламентирует процедуру операционного контроля построением контрольных карт. Это позволяет привести технологический процесс производства в состояние статистической стабильности и воспроизводимости.

Для проведения приемочного контроля применяются нормативные документы Р 50-110-89 «Рекомендации. Приемочный контроль качества продукции. Основные положения», ГОСТ Р ИСО/ТО 8550-3-2008, ГОСТ Р 50779.11-2000 (ИСО 3534.2-93) «Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и

определения», ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», ГОСТ Р 50779.50-95 «Статистические методы. Приемочный контроль качества по количественному признаку. Общие требования» и др.

В ГОСТ Р ИСО 12491-2011 «Материалы и изделия строительные. Статистические методы контроля качества» описана процедура проведения выборочного контроля с учетом вариабельности результатов измерений. Из партии отбирают выборку, состоящую из  $n$  единиц продукции, определяют среднее значение выборки  $\bar{x}$  и среднее квадратическое отклонение  $s$ . При заданной нижней границы поля допуска НД партию принимают, если

$$\bar{x} - k_s s > НД, \quad (3)$$

и не принимают, если данное неравенство не выполняется.

При заданной верхней границы поля допуска ВД партию принимают, если

$$\bar{x} + k_s s < ВД \quad (4)$$

и не принимают, если данное неравенство не выполняется.

Если заданы обе границы поля допуска НД и ВД, то для приемки партии должны выполняться оба вышеуказанных неравенства: если одно или оба неравенства не выполняются, партию не принимают. Для предварительной оценки может быть использована упрощенная процедура. По таблице 6 ГОСТ Р ИСО 12491-2011 для вероятности  $p = 0,95$  и выбранной доверительной вероятности  $y = 0,75$  определяют значение  $k_s$ , и затем проверяют выполнение условия (3) и (4).

Известно, что сырью, любому технологическому процессу присуще определенная доля вариабельности. Полная изменчивость процесса зависит от влияния как случайных (обычных), так и неслучайных (особых) причин вариаций. Это, несомненно, оказывает влияние на показатели качества конечной продукции и решение о приемке партии.

Учитывая вышеизложенное, актуальным является сопоставление решения о приемке партии бетона в соответствии с различными нормативными документами, а также оценка влияния вида цемента на это решение.

Материалы и методы. Было проверено решение о качестве бетона марки 300 при изготовлении внутренних стеновых панелей по данным заводской лаборатории ОАО «Завод ЖБК-1» (г. Пенза). При изготовлении бетона применялся кварцевый песок Чадаевского месторождения с

модулем крупности  $M=1,83$ , карбонатный щебень фракции 5–20 мм плотностью  $1445 \text{ кг/м}^3$ , маркой по дробимости 1000. В качестве цемента применялся Сенгилеевский ЦЕМ I 42,5Б (Евроцементгрупп), Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н компании «ХайдельбергЦемент Волга».

Число образцов бетона в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» составляло  $n=3$ , т.к. коэффициент вариации прочности бетона менее 5 %.

Значение коэффициента  $k_S$  при выбранной доверительной вероятности  $\gamma=0,75$  и установленной вероятности  $p=0,95$  при  $n=3$  составляло 3,15 (таблица 6 ГОСТ Р ИСО 12491-2011).

Образцы бетона были испытаны на сжатии в возрасте 28 суток твердения.

При применении Сенгилеевского цемента ЦЕМ I 42,5Б прочность при сжатии стандартных образцов бетона в возрасте 28 суток составляла  $312,66 \text{ кгс/см}^2$ , значение коэффициента вариации 1 %, среднее квадратическое отклонение  $s=3,12 \text{ кгс/см}^2$  [7–9].

При применении цемента Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н прочность при сжатии стандартных образцов бетона в возрасте 28 суток составляла  $333,66 \text{ кгс/см}^2$ , значение коэффициента вариации 4,2 %, среднее квадратическое отклонение  $s=14,15 \text{ кгс/см}^2$ .

Основная часть. Значения прочности бетона, указанные выше, в соответствии с требованиями ГОСТ 18105-2018 показывают, что партия должна быть принята. Условия формул (1), (2) выполняются.

Однако, расчет по формулам (3), (4) свидетельствует, что при применении Сенгилеевского цемента ЦЕМ I 42,5Б при  $n=3$  (ГОСТ Р ИСО 12491-2011) условие принятия партии (3) и (4) выполняются, а при применении цемента Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н условие принятие партии (3) не выполняется. И только, увеличивая количество образцов для испытания, можно получить положительное решение и приемке партии. Так, при  $n=6$  или 10 значение  $k_S$  составляет соответственно 2,34 и 2,10 и тогда условие приемки (3) при применении цемента Хальденберг выполняется (табл. 1).

ГОСТ Р ИСО/ТО 8550-3-2008 «Статистические методы. Руководство по выбору и применению систем статистического приемочного контроля дискретных единиц продукции в партиях. Часть 3. Выборочный контроль по количественному признаку» описывает процедуру приемочного контроля. Критерии приемлемости имеют вид

$$Q_B = \frac{ВД - \bar{x}}{s} \quad (5)$$

и (или)

$$Q_n = \frac{\bar{x} - \text{НД}}{s} \quad (6) \quad \text{где } Q - \text{ статистика качества; } \bar{x} - \text{ среднее арифметическое значение показателя качества.}$$

Таблица 1

**Выполнение условий приемки партии бетона**

Формулы расчета	Сенгилеевский цемент			Цемент Хальденберг		
	n=3, $k_s=3,15$	n=6, $k_s=2,34$	n=10, $k_s=2,10$	n=3, $k_s=3,15$	n=6, $k_s=2,34$	n=10, $k_s=2,10$
$\bar{x} - k_s \sigma$	302,832	305,36	306,108	289,08	300,549	303,945
$\bar{x} + k_s \sigma$	322,488	319,96	319,212	378,23	366,771	363,375

Если соответствующая статистика больше или равна контрольному нормативу k, то партия принимается, в противном случае она отклоняется.

Были проведены расчеты статистики качества Q, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Соотношение статистики качества Q в зависимости от вида цемента и уровня дефектности**

Вид цемента	Уровень дефектности		
	0,1 %, k=2,42	1 %, k=1,45	2,5 %, k=1,12
Хальденберг	1,15 < 2,42 2,37 < 2,42	1,15 < 1,45 2,37 > 1,45	1,15 > 1,12 2,37 > 1,12
Сенгилеевский	11,96 > 2,42 4,02 > 2,42	1,96 > 1,45 4,02 > 1,45	1,96 > 1,12 4,02 > 1,12

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что партия бетона на основе Сенгилеевского цемента принимается независимо от уровня дефектности продукции. Значение статистики качества Q больше контрольного норматива k

Партия бетона на основе цемента Хальденберг не может быть принята при уровне дефектности AQL, равном 0,1 % и 1 %, так как статистика качества Qv < k. Партия может быть принята только при уровне дефектности AQL, равном 2,5 %.

Такое состояние качества бетона на основе цемента Хальденберг и спорное решение о приемке партии определяется значением среднеквадратического отклонения, равным  $\sigma=14,15$  кгс/см<sup>2</sup>, что значительно больше по сравнению со значением среднеквадратического отклонения  $\sigma=3,12$  кгс/см<sup>2</sup> (на основе Сенгилеевского цемента) [10, 11].

Таким образом, имеется некоторое несоответствие при решении о принятии партии между требованиями, указанными в ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2018, ГОСТ Р ИСО 12491-2011 и ГОСТ Р ИСО/ТО 8550-3-2008. На наш взгляд, требуется внести коррективы в ГОСТ 10180-2012 в пункт 4 в части количества образцов для испытаний с учетом требований ГОСТ Р ИСО 12491. Это будет способствовать более объективному решению о приемке или отклонению партии продукции.

Были рассчитаны индексы воспроизводимости и оценка стабильности процесса производства бетона для внутренних стеновых панелей по формулам

$$C_{pk} = \frac{\text{ВД} - \bar{x}}{3\sigma} \quad (7)$$

или

$$C_{pk} = \frac{\bar{x} - \text{НД}}{3\sigma}, \quad (8)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение прочности;  $C_{pk}$  – индекс воспроизводимости, НД, ВД – соответственно нижний и верхний допуски на показатели качества продукции.

Для бетона марки 300 значения НД и ВД составляют соответственно 300 и 350 кгс/см<sup>2</sup>.

Результаты расчета показывают, что значение индекса воспроизводимости для процесса производства бетона с применением цемента Хальденберг составляет  $C_{pk} = 0,38$ , что характеризует процесс как невоспроизводимый. При применении Сенгилеевского цемента значение индекса воспроизводимости составляет  $C_{pk} = 1,35$ , процессе является воспроизводимым.

Были рассчитаны вероятности появления дефектной продукции при применении различных цементов с учетом функции Лапласа

$$\Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma}\right) \pm \Phi\left(\frac{\bar{x} - a}{\sigma}\right), \quad (9)$$

где a – середина поля допуска;  $\bar{x}$  – среднее значение показателя качества.

Установлено, что в случае изготовления бетона на Сенгилеевском цементе вероятность появления дефектной продукции составляет P=0,004 %, а на цементе Хальденберг – 12,5 %.

Безусловно, на воспроизводимость процесса оказывает влияние режим тепловой обработки, качество крупного и мелкого заполнителя, однако приведенные выше данные убедительно свидетельствуют о влиянии вида цемента на состояние технологического процесса. Проведенные статистические расчеты с применением карт Шухарта показали, что технологический процесс производства бетона с применением цемента Хальденберг является статистически не управляемым и не воспроизводимым, что требует его корректировки со стороны высшего руководства и инженерно-технического персонала.

#### Выводы.

1. Показано влияние вида цемента на воспроизводимость и стабильность технологического процесса производства бетона и уровень дефектности продукции. Установлено, что при применении Сенгилеевского цемента процесс производства бетона является воспроизводимым, а при применении цемента Хальденберг – не воспроизводимым и не стабильным. Требуется корректировка со стороны высшего руководства и инженерно-технического персонала.

2. Выявлено, что имеется некоторое несоответствие при решении о принятии партии между данными, заложенными в ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2018, ГОСТ Р ИСО 12491-2011 и ГОСТ Р ИСО/ТО 8550-3-2008. Установлена необходимость внесения корректировок в ГОСТ 10180-2012 в пункт 4 в части количества образцов для испытаний с учетом требований ГОСТ Р ИСО 12491.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина В.И., Учаева Т.В. К вопросу о системе контроля качества на предприятиях

*Информация об авторах*

**Логанина Валентина Ивановна**, доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством и технологии строительного производства. E-mail: loganin@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г.Титова, д. 28.

**Зайцева Мария Владимировна**, аспирант кафедры управления качеством и технологии строительного производства. E-mail: zajc@yandex.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г.Титова, д. 28.

*Поступила 29.01.2021 г.*

© Логанина В.И., Зайцева М.В., 2021

**\*Loganina V.I., Zaytceva M.V.**

*Penza State University of Architecture and Construction*

*\*E-mail: loganin@mail.ru*

#### TO THE QUESTION OF CONCRETE QUALITY CONTROL

**Abstract.** The article provides information on the results of assessing the quality of concrete internal wall panels. The requirements of various regulatory documents for the rules for accepting a batch of concrete are considered. The procedure of statistical sampling control on a quantitative basis is described. According to the statistical data of the factory laboratory of Open Joint Stock Company "ZhBK-1" (Penza) on the quality

of grade 300 concrete in the manufacture of internal wall panels, the influence of the type of cement on the variability of concrete strength indicators is considered. The influence of the type of cement on the decision to accept a batch of concrete is established. Due to the higher value of the standard deviation of the quality indicators of Haldenberg cement in comparison with Sengileevsky cement, the acceptance of a batch of concrete depends on the level of product defectiveness. It is revealed that, depending on the number of samples during testing, the decision on batch acceptance, made in accordance with GOST 10180-2012 and GOST R ISO 12491-2011, may be different. It is proposed to amend GOST 10180-2012 in paragraph 4 regarding the number of samples for testing, taking into account the requirements of GOST R ISO 12491. This will contribute to a more objective decision on the acceptance of the batch. The effect of the type of cement on the reproducibility of the production process is shown.

**Keywords:** concrete, control rules, number of samples, probability, strength, standard deviation, reproducibility

## REFERENCES

1. Loganina V.I., Uchaeva T.V. On the question of the quality control system at the enterprises of the construction industry [K voprosu o sisteme kontrolya kachestva na predpriyatiyah stroiindustrii]. Regional architecture and construction. 2010. No. 1. Pp. 31–33. (rus)
2. Loganina V.I., Kruglova A.N. Reliability of quality control of building materials and products [Dostovernost kontrolya kachestva stroitelnykh materialov i izdelii]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2014. No. 2. Pp. 16–18. (rus)
3. Loganina V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures [Organizatsiya statisticheskogo priemnochnogo kontrolya kachestva stroitelnykh izdelii i konstruktsii]. Stroitelnye materialy. 2008. No. 8. Pp. 98–99. (rus)
4. Serykh V.I., Porvatov S.P., Sedinin V.I. Multiparameter control of products: reliability and costs [Mnogoparametricheskii kontrol produktsii\_ dostovernost i zatraty]. Methods of quality management. 2010. No. 5. Pp. 48–52. (rus)
5. Rubichev N.A., Frumkin V.D. Reliability of tolerance quality control [Dostovernost dopuskovogo kontrolya kachestva]. M.: Publishing house of standards, 1990. 172 p. (rus)
6. Omair A. Sample size estimation and sampling techniques for selecting a representative sample. J. Health Spec. 2014. 2. Pp. 142–147.
7. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities [Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika \_ uchebnik dlya vuzov]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2020. 479 p. (rus)
8. Mosteller F. Representative sampling. Int. Stat. Rev. 1979. 47. Pp. 13–24.
9. Song P.S., Wu J.C., Hwang S., Sheu B.C. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete. Cement and Concrete Research, 2005. 35 (2). Pp. 393–399.
10. Shindlovsky E., Shchurts O. Statistical methods of quality management [Statisticheskie metody upravleniya kachestvom]. M.: Mir, 1976. 598 p. (rus)
11. Adler Yu.P., Rozovsky B.L. Operational statistical quality management [Operativnoe statisticheskoe upravlenie kachestvom]. Moscow: Knowledge, 1984. 102 p. (rus)

### Information about the authors

**Loganina, Valentina I.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Quality Management and Construction Production Technology. E-mail: loganin@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

**Zaytceva, Maria V.** Postgraduate student of the Department of Quality Management and Construction Production Technology. E-mail: zajc@yandex.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

Received 29.01.2021

### Для цитирования:

Логанина В.И., Зайцева М.В. К вопросу о контроле качества бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 8–12. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-12

### For citation:

Loganina V.I., Zaytceva M.V. To the question of concrete quality control. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 8–12. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-12

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-13-20

**\*Крушельницкая Е.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru

## ОЦЕНКА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ БЕТОНА

**Аннотация.** На основе изменения цвета органического красителя – родамина Б на поверхности бетона под действием ультрафиолетового излучения была проведена теоретическая и экспериментальная оценка фотокаталитической активности бетона. Фотокаталитическая активность рассчитывалась по полученным координатам колориметрии  $L^* a^* b^*$ . Для возможности оценки работы фотокатализатора во времени проводился тест с образцами бетона в возрасте 7 и 28 суток. В качестве фотокатализатора в исследовании использовался диоксид титана трех видов анатазной модификации зарубежного производителя. Показано, что введение диоксида титана в бетон способствует самоочищению его поверхности. Получены значения обесцвечивания красителя на поверхности бетона в зависимости от его состава и от времени воздействия ультрафиолетового излучения. Определено, что значение величины удельной поверхности диоксида титана влияет на фотокаталитическую активность. Отмечено, что с возрастом бетонных образцов происходит заметное снижение фотопревращения. Выявлена закономерность: чем выше фотокаталитическая активность в образцах изначально, тем сильнее эти образцы подвержены влиянию процессов гидратации, что приводит к более резкому снижению фотокаталитической активности с возрастом бетона. Так же установлено, что высокая удельная поверхность диоксида титана позволяет ему проявлять свои фотокаталитические свойства со временем.

**Ключевые слова:** фотокаталитические свойства, самоочищение, диоксид титана, органический пигмент, ультрафиолетовое излучение.

**Введение.** Требования к эстетическим характеристикам архитектурных зданий и сооружений в последние годы заметно возросли [1–5]. Большое внимание уделяется качеству используемых материалов при производстве изделий и строительстве, так как подобранный состав влияет не только на внешнюю декоративность, но и на эксплуатационные свойства. Качественный состав и отделка дает гарантию не только на долговечность изделий, но и возможность минимизировать расходы на их содержание и уход.

Для улучшения технических свойств и долговечности бетонов используются химические добавки [6–8].

Модифицирование бетона фотокатализатором позволяет разлагать загрязняющие вещества на его поверхности, вследствие чего данный бетон становится менее подвержен разрушению под влиянием окружающей среды. Возможность самоочищаться способствует сохранению его естественного цвета, предотвращению размножения микроорганизмов и уменьшению содержания вредных веществ в воздухе примерно на 70 % [9, 10].

В роли фотокатализаторов широко используются полупроводниковые оксиды или сульфиды на основе металлов ( $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $CdS$ ,  $Fe_2O_3$  и др.) [8]. Диоксид титана ( $TiO_2$ ) на сегодняшний день является одним из перспективных материалов в качестве активного фотокатализатора [11].

Данный материал получил наибольшее распространение в силу своей относительной дешевизны и высокой эффективности.

Добавление  $TiO_2$  в бетон позволит не только сэкономить на отделке зданий, но и избавит от необходимости постоянной очистки фасадов. Все это будет способствовать сохранению декоративности внешнего вида здания, что в свою очередь даст гарантию долговечности изделий.

Использование белого цемента с  $TiO_2$  на поверхности зданий и сооружений способствует повышению долговечности визуального облика здания [11].

Наибольший коммерческий интерес представляет диоксид титана анатазной модификации в связи с его высокой фотокаталитической активностью [12–14].

Целью исследования является определение эффективности действия  $TiO_2$  в бетоне в качестве фотокатализатора и оценка его способности к самоочистке.

**Материалы и методы.** Для оценки фотокаталитической активности бетонных образцов автором проведен тест на самоочистку согласно итальянскому стандарту UNI 11259-2016 [15].

Эффективность оценки по стандарту заключается в измерении фотокаталитической активности в бетоне с помощью колориметрического метода, который заключается в нанесении на поверхность бетонных образцов органического красителя – родамина Б [16]. После образцы подвер-

гают воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения в течение 26 часов, с контролем колориметрического измерения во времени.

Для проведения данного теста применялись следующие материалы и оборудование: герметичный контейнер, колориметр, ультрафиолетовая лампа – А, родамин Б и образцы бетона.

В качестве вяжущего вещества в исследовании применялся портландцемент СЕМ I 52,5 R (белый) EN 197-1:2011 ГОСТ 965-89, Aalborg White (быстротвердеющий), Египет. В качестве

мелкозернистого наполнителя использовали отсеvy дробления мрамора.

В качестве фотокатализатора в работе использовались три вида диоксида титана анатазной модификации зарубежного производителя. Фотокатализатор вводился в объем бетона в процессе производства в количестве 5 % от массы цемента. Физико-химические характеристики и общий вид  $TiO_2$  представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1

### Физико-химические характеристики диоксида титана

TiO <sub>2</sub>	Физико-химические показатели			
	Содержание TiO <sub>2</sub> , %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Кристаллическая фаза	Внешний вид (при 20 °С)
А	94,1	82	анатаз	Твердый мелкокристаллический белый порошок
Б	99,5	10,1	анатаз	Твердый мелкокристаллический белый порошок, наноматериал
В	92,7	282	анатаз	Твердый мелкокристаллический белый порошок, наноматериал

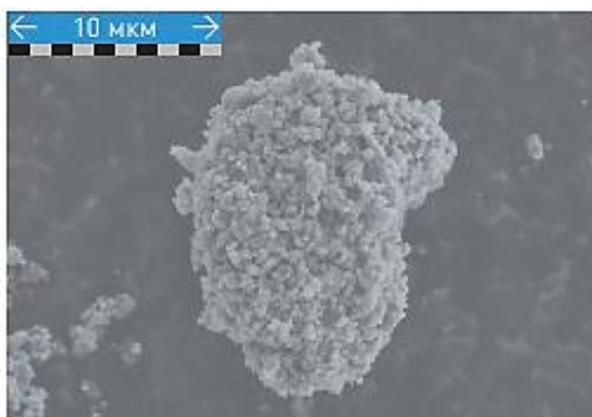


Рис. 1. Вид и типичный размер частицы диоксида титана

**Основная часть.** Для оценки фотокаталитической активности было изготовлено 2 партии образцов бетона – кубики размером 50×50×50 мм (рис. 2) - три образца бетона с TiO<sub>2</sub> различных видов и контрольный образец. Для первой партии

образцов тест проводился в возрасте 7 суток, для второй – в возрасте 28 суток. Образцы испытывались в разном возрасте для возможной оценки работы фотокатализатора во времени.



Рис. 2. Образцы бетона для испытания

Для окраски приготовлен раствор красителя родамина Б, который наносился на подготовленную поверхность образцов.

Затем образцы помещались в деревянный шкаф под ультрафиолетовую лампу (УФ-А,

315-400 нм), установленную на высоте около 20 см от кубиков на 26 часов. Фото образцов сразу после нанесения раствора, через 4 и 26 часов представлены на рис. 3.

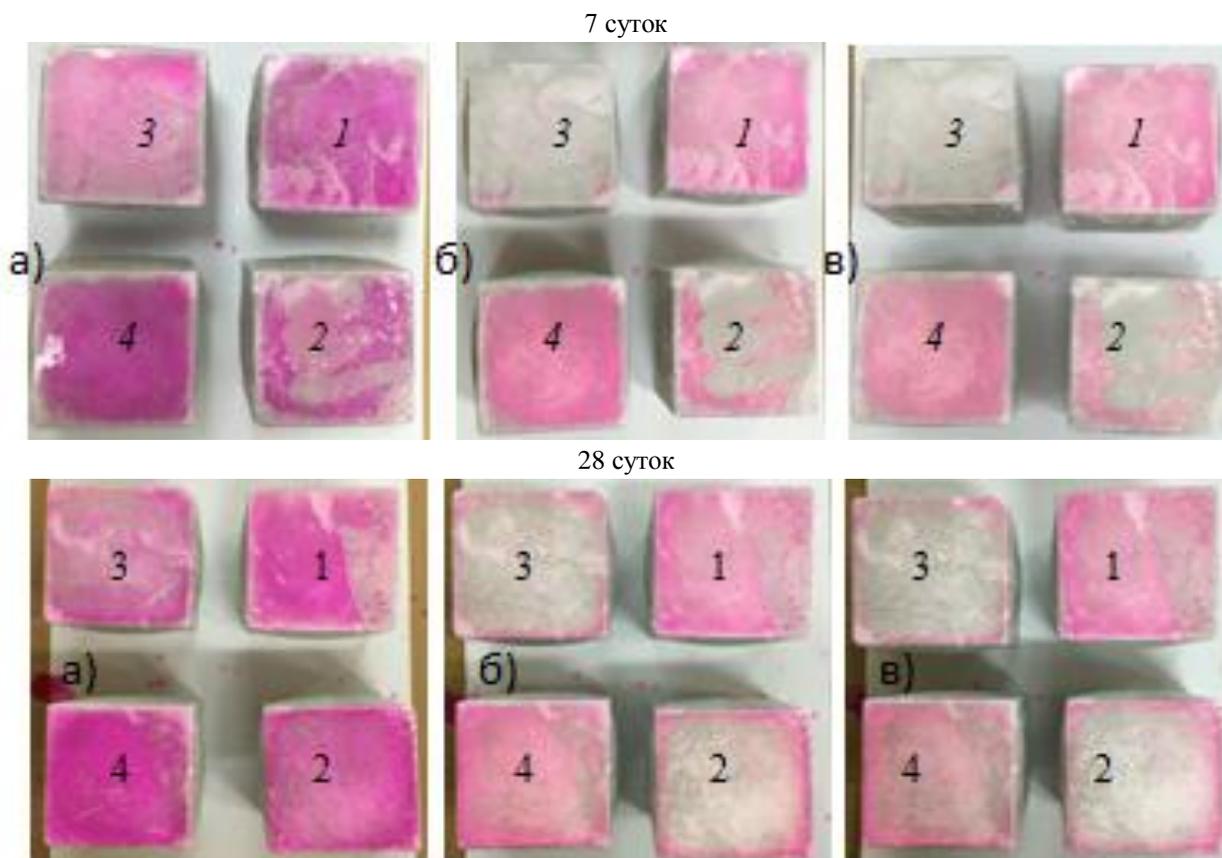


Рис. 3. Поверхность образцов после нанесения родамина Б: а – сразу после нанесения; б – через 4 часа; в – через 26 часов; 1 – контрольный образец; 2 – образец с  $\text{TiO}_2$  А; 3 – образец с  $\text{TiO}_2$  Б; 4 – образец с  $\text{TiO}_2$  В

После нанесения красителя проведено измерение цвета поверхности (с помощью визуального наблюдения и фотографирования) по системе CIE LAB с использованием цветковых координат  $L^* a^* b^*$ , где  $L^*$  – светимость,  $a^*$  и  $b^*$  – координаты колориметрии, которые представляют собой измерение цветового тона в двухмерной плоскости. Анализ цифровых данных изображений произведен с помощью программного обеспечения ImageJ. Оценка фотокаталитической активности рассчитывалась по формулам [15] через 4 и 26 часов:

$$R_4 = \frac{a_0 - a_4}{a_0} \cdot 100 > 20\%, \quad (1)$$

$$R_{26} = \frac{a_0 - a_{26}}{a_0} \cdot 100 > 50\%, \quad (2)$$

где  $a_0$  – значение цветовой координаты в нулевой момент времени;

$a_4$  – значение цветовой координаты после 4 часов УФ излучения;  $a_{26}$  – значение цветовой координаты после 26 часов УФ излучения.

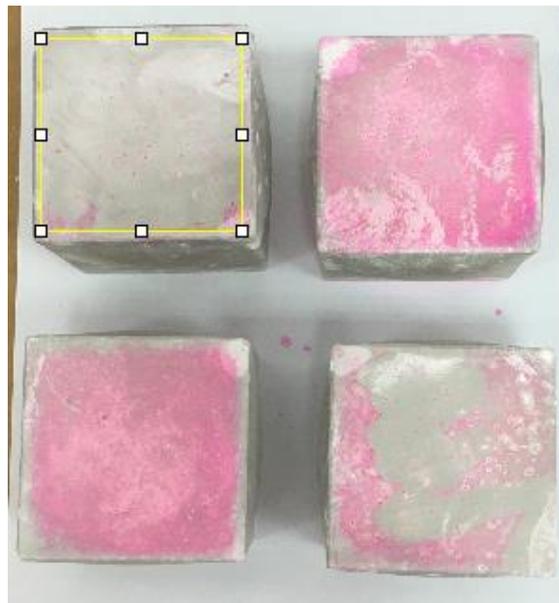
Значения R должны быть более 20 % спустя 4 часа и более 50 % спустя 26 часов воздействия УФ излучения, согласно стандарту UNI 11259, который определяет, проявляет ли бетон фотокаталитическую активность,

На рис. 4 представлены этапы обработки изображения в программе ImageJ.

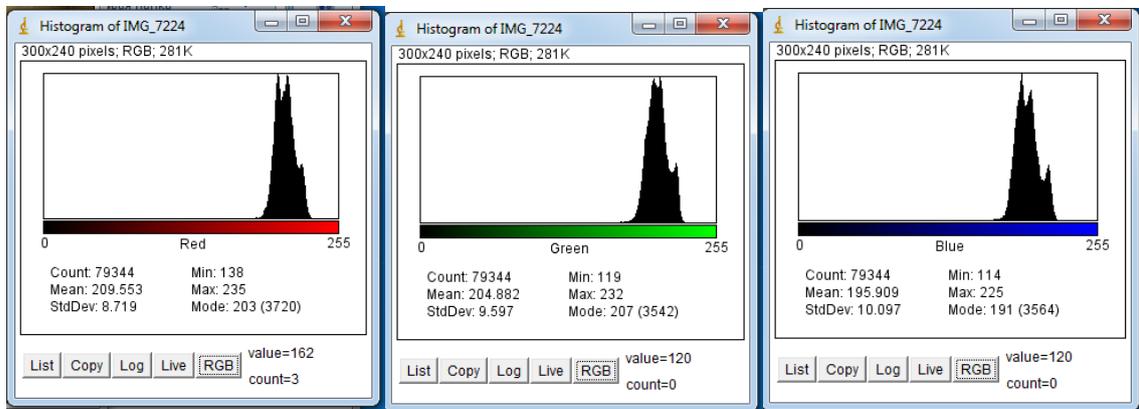
По полученным координатам рассчитывается фотокаталитическая активность. Результаты анализа отражены в диаграмме, представленной на рис. 5.

Исследуемый материал является фотокаталитическим по отношению к родамину Б, если он соответствует требованиям выражений 1 и 2, согласно стандарту UNI 11259.

а)



б)



в)

С помощью универсального конвертер цветов вы можете легко перевести цвет из одной цветовой модели в ряд других.

В первую очередь, калькулятор служит для удобной работы с современными форматами CSS3-цветов. Поддерживается конвертация из HEX в RGB/RGBA и HSL/HSLA, RGB в CMYK, XYZ, LAB, и обратно.

А также специальный функционал для замещения альфа-канала при переводе цвета из RGBA в RGB (и HSLA в HSL).

Цветовая модель: **RGB**

Цвет фона для заполнения альфа-канала (RGBA в RGB): **3**

Точность округления (кол-во знаков после запятой): **3**

R: **209,553** G: **204,882** B: **195,909**

HEX	#d1ccc3	WEBSAFE	#CCC
RGB	rgb(209, 204, 195);	RGBA	rgba(209, 204, 195, 1);
% RGB	rgb(81.961%, 80%, 76.471%);	% RGBA	rgb(81.961%, 80%, 76.471%, 1);
HSL	hsl(39, 13.208%, 79.216%);	HSLA	hsla(39, 13.208%, 79.216%, 1);
CMYK	0%, 2.392%, 6.699%, 18.039%	HSB/HSV	39, 6.699%, 81.961%
XYZ	57.738, 60.681, 60.299	<b>LAB</b>	<b>82.207, 0.153, 5.082</b>

Рис. 4. Этапы обработки изображений с помощью программного обеспечения: а – выделение области для анализа; б – получение значений в пространстве RGB; в – перевод в координаты L\* a\* b\*

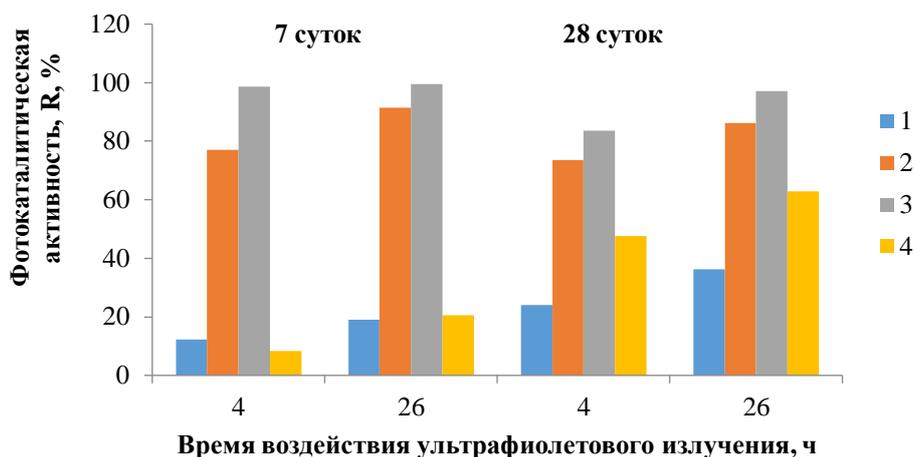


Рис. 5. Результаты обесцвечивания родамина Б для каждого образца

Визуальные наблюдения (рис. 6) также показывают, что обесцвечивание красителя существенно отличается с течением времени. Образцы 2 и 3 с добавками  $\text{TiO}_2$  А и Б соответственно, показали лучший результат по удалению красителя, поверхность образцов практически обесцвечена. Однако с возрастом эта активность снижается, на что влияет процесс гидратации [8]. При визуальной оценке между образцами 1 и 4 не наблюдается существенной разницы в изменении цвета поверхности. Однако полученные координаты колориметрии при анализе цифровых данных изображений в программном обеспечении ImageJ, позволяют определить точное значение фотокалалитической активности (рис. 5).

Установлено, что контрольный образец без добавления диоксида титана не проявил своей фотокалалитической активности, так как полученные значения R не соответствуют требованиям стандарта. Образец 4 с добавкой  $\text{TiO}_2$  В не проявил своей активности в возрасте 7 суток, но показал хороший результат через 28 суток. По результатам расчета образец 4 в возрасте 28 суток считается фотокалалитически активным по отношению к удалению красителя родамина Б, так как полученные значения R более 20 % спустя 4 часа и более 50 % спустя 26 часов воздействия УФ излучения, что соответствует требованию стандарту UNI 11259,

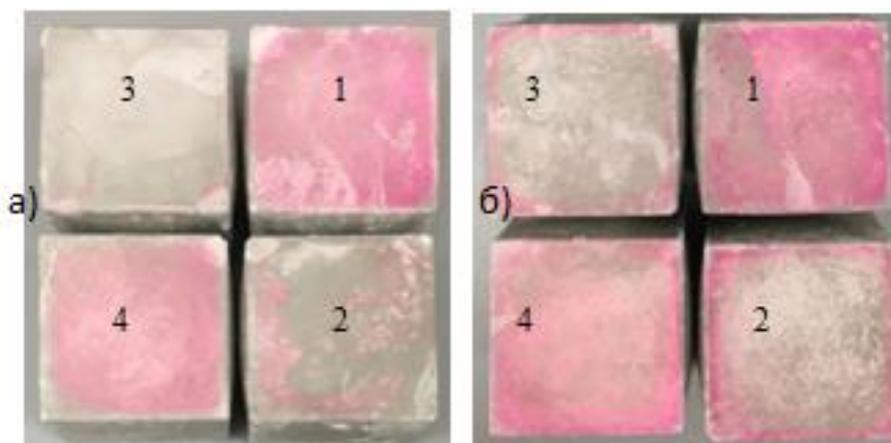


Рис. 6. Вид образцов после УФ-излучения: а – в возрасте 7 суток; б – в возрасте 28 суток

Добавление  $\text{TiO}_2$  со средним размером 10-15 нм частиц в бетонную смесь ускоряет образование геля C-S-H, что приводит к высокому количеству  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Образование этих продуктов способствует блокировке активных центров на поверхности  $\text{TiO}_2$ , в результате химической реакции диоксида титана и гидроксида кальция происходит снижение фотокалалитической активности. Из этого можно выявить закономерность:

чем выше фотокалалитическая активность в образцах изначально, тем сильнее эти образцы подвержены влиянию химической реакции между продуктами гидратации, что способствует более резкому снижению фотокалалитической активности с возрастом бетона.

**Выводы.** По результатам проведенного исследования оценки фотокалалитической активности добавок можно сделать следующие выводы:

– введение диоксида титана в бетон способствует самоочищению его поверхности по сравнению с контрольным образцом;

– образцы без диоксида титана не проявили своей фотокаталитической активности, несмотря на то, что со временем в результате высушивания небольшое обесцвечивание красителя все же наблюдалось;

– наибольшая фотокаталитическая активность наблюдается у образцов 2 и 3, из чего можно заключить, чем ниже значение удельной поверхности частицы фотокатализатора, тем выше его способность к самоочищению;

– лучший результат по обесцвечиванию красителя отмечен у образца 3. Уже спустя 4 часа после воздействия УФ излучения отмечено практически полное обесцвечивание красителя, что можно охарактеризовать более высоким содержанием  $TiO_2$  и низкой величиной удельной поверхности частицы;

– образец 4 с добавкой  $TiO_2$  В не проявил своей активности к самоочищению в возрасте 7 суток, однако в возрасте 28 суток по результатам оценки наблюдается способность к обесцвечиванию красителя, из чего можно сделать вывод, что высокая удельная поверхность частицы способна проявлять свои фотокаталитические свойства со временем;

– влияние химической реакции между продуктами гидратации способствует снижению фотокаталитической активности, чем выше активность на ранних сроках, тем сильнее образцы подвержены этим реакциям, что приводит к более резкому снижению фотокаталитической активности с возрастом бетона.

Выполненные исследования показали эффективность используемых в работе добавок в качестве фотокатализатора, обеспечивая их высокую фотокаталитическую активность в бетоне. Однако результаты теста показали неоднозначные результаты во времени, что, вероятнее всего, связано с протеканием процессов гидратации в цементной матрице, что требует дальнейших исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников В.И. Бетоны старого и нового поколений. Состояние и перспективы // Наука: 21 век. 2012. №1. С 60–67.
2. Chen J., Poon CS. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. Build. Environ. 2009. Vol. 44. Pp. 1899–1906.
3. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Погорелова И.А., Яковлева Е.А., Корякина А.А. Декоративные элементы как способ эстетического осмысления пространства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 7–13.
4. Сулейманова Л.А., Гридчин А.М., Малюкова М.В., Морозова Т.В. Повышение архитектурной выразительности плит бетонных тротуарных // В сборнике: Научно-технические инновации Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 347–353.
5. Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы. Свойства. Применение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 16–25
6. Лукотцова Н.П., Постникова О.А., Соболева Г.Н., Ротарь Д.В., Оглобина Е.В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана // Строительные материалы. 2015. №11. С. 5–8.
7. Лабuzова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Свойства фотокаталитического композиционного материала на основе кремнеземного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 85–92.
8. Lackhoff M., Prieto X., Nestle N., Dehn F., Niessner R. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement - Influence of semiconductor type and cement ageing. Appl. Catal B. 2003. Vol. 43. Pp. 205–216.
9. Mills A, Elouali S. The nitric oxide ISO photocatalytic reactor system: measurement of NOx removal activity and capacity. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2015. Vol. 305. Pp. 29–36.
10. Puzenat E. Photocatalytic self-cleaning materials: Principles and impact on atmosphere. Eur. Phys. J. Conferences 1. 2009. Pp. 69–74.
11. Shen S., Burton M., Jobson B., Haselbach L., Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. Pp. 874–883.
12. Wang X, Hu Z, Chen Y, Zhao G, Liu Y, Wen Z. A novel approach towards high-performance composite photocatalyst of  $TiO_2$  deposited on activated carbon. Appl Surf Sci. 2009. Vol. 255. Pp. 3953–3958.
13. Shen W.G., Zhang C., Li Q., Zhang W.S., Cao L., Ye J.Y. Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. J. Clean. Prod. 2015. Vol. 87. Pp. 762–765.
14. Anpo M., Takeuchi M. The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation. Journal of Catalysis. 2003. Vol. 216. Pp. 505–516.

15. UNI 11259:2016. Photocatalysis - Determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders - Rodamina test method.

16. Folli A., Jakobsen U.H., Guerrini G.L., Macphee D.E., Rhodamine B. Discolouration on

TiO<sub>2</sub> in the Cement Environment: A Look at Fundamental Aspects of the Self-cleaning Effect in Concretes. J. Adv Oxid Technol. 2009. Vol. 12 (1). Pp. 126–133.

*Информация об авторах*

**Крушельницкая Екатерина Александровна**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru](mailto:ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.03.2021 г.

© Крушельницкая Е.А., 2021

**\*Krushelnitskaya E.A.**

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

*\*E-mail: [ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru](mailto:ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru)*

## EVALUATION OF PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF CONCRETE

**Abstract.** *A theoretical and experimental assessment of the photocatalytic activity of concrete is carried out based on the change in the color of an organic dye – rhodamine B, on the surface of concrete under the action of ultraviolet radiation. Photocatalytic activity is calculated using the obtained coordinates of colorimetry  $L * a * b$ . To assess the performance of the photocatalyst over time, a test is carried out with concrete samples at the age of 7 and 28 days. Titanium dioxide of three types of anatase modification of a foreign manufacturer is used as a photocatalyst in the study. It is shown that the introduction of titanium dioxide into concrete promotes self-cleaning of its surface. The values of discoloration of the dye on the concrete surface are obtained depending on its composition and on the time of exposure to ultraviolet radiation. It is determined that the value of the specific surface area of titanium dioxide affects the photocatalytic activity. It is noted that with the age of concrete samples, there is a noticeable decrease in phototransformation. A regularity is revealed: the higher the photocatalytic activity in the samples initially, the more they are subject to the influence of hydration processes, which leads to a sharper decrease in the photocatalytic activity with the age of concrete. In addition, it is found that the high specific surface area of titanium dioxide exhibits its photocatalytic properties over time.*

**Keywords:** *photocatalytic properties, self-cleaning, titanium dioxide, organic pigment, ultraviolet radiation.*

## REFERENCES

1. Kalashnikov V.I. Old and new generation concretes. State and prospects. [Betony starogo i novogo pokolenij. Sostoyanie i perspektivy]. Science: 21st century. 2012. Vol. 1. Pp. 60–67. (rus)

2. Chen J., Poon CS. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. Build. Environ. 2009. Vol. 44. Pp. 1899–1906.

3. Suleimanova L.A., Malyukova M.V., Pogorelova I.A., Yakovleva E.A., Koryakina A.A. Decorative elements as a way of aesthetic understanding of space. [Dekorativnye elementy kak sposob esteticheskogo osmysleniya prostranstva]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 7–13. (rus)

4. Suleimanova L.A., Gridchin A.M., Malyukova M.V., Morozova T.V. Increasing the architectural expressiveness of concrete sidewalk slabs.

[Povyshenie arhitekturnoj vyrazitel'nosti plit betonnyh trotuarnyh]. V sbornike: Naukoemkie tekhnologii i innovacii YUbilejnaya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya 60-letiyu BGTU im. V.G. SHuhova (XXI nauchnye chteniya). 2014. Pp. 347–353. (rus)

5. Antonenko M.V., Ogurtsova Yu.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. Cement-based photocatalytically active self-cleaning materials. Compositions. Properties. Application. [Fotokataliticheski aktivnye samoochishchayushchiesya materialy na osnove cementa. Sostavy. Svoystva. Primenenie]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 16–25. (rus)

6. Lukottsova N.P., Postnikova O.A., Soboleva G.N., Rotar D.V., Oglobina E.V. Photocatalytic coating based on the addition of nanodispersed titanium dioxide. [Fotokataliticheskoe pokrytie na osnove dobavki nanodispersnogo dioksida titana]. Building materials. 2015. Vol. 11. Pp. 5–8. (rus)

7. Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Yu.N., Stroikova V.V. Properties of a photocatalytic composite material based on silica raw materials. [Svoystva fotokataliticheskogo kompozitsionnogo materiala na osnove kremnezemnogo syr'ya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov 2018. Vol. 8. Pp. 85–92. (rus)
8. Lackhoff M., Prieto X., Nestle N., Dehn F., Niessner R. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement - Influence of semiconductor type and cement ageing. Appl. Catal B. 2003. Vol. 43. Pp. 205–216.
9. Mills A., Elouali S. The nitric oxide ISO photocatalytic reactor system: measurement of NO<sub>x</sub> removal activity and capacity. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2015. Vol. 305. Pp. 29–36.
10. Puzenat E. Photocatalytic self-cleaning materials: Principles and impact on atmosphere. Eur. Phys. J. Conferences 1. 2009. Pp. 69–74.
11. Shen S., Burton M., Jobson B., Haselbach L. Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. Pp. 874–883.
12. Wang X, Hu Z, Chen Y, Zhao G, Liu Y, Wen Z. A novel approach towards high-performance composite photocatalyst of TiO<sub>2</sub> deposited on activated carbon. Appl Surf Sci. 2009. Vol. 255. Pp. 3953–3958.
13. Shen W.G., Zhang C., Li Q., Zhang W.S., Cao L., Ye J.Y. Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. J. Clean. Prod. 2015. Vol. 87. Pp. 762–765.
14. Anpo M., Takeuchi M. The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation. Journal of Catalysis. 2003. Vol. 216. Pp. 505–516.
15. UNI 11259:2016. Photocatalysis - Determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders - Rodamina test method.
16. Folli A., Jakobsen U.H., Guerrini G.L., Macphee D.E., Rhodamine B. Discolouration on TiO<sub>2</sub> in the Cement Environment: A Look at Fundamental Aspects of the Self-cleaning Effect in Concretes. J. Adv Oxid Technol. 2009. Vol. 12 (1). Pp. 126–133.

*Information about the authors*

**Krushelnitskaya, Ekaterina A.** Postgraduate student. E-mail: ekaterina.yakovleva2710@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 25.03.2021*

**Для цитирования:**

Крушельницкая Е.А. Оценка фотокаталитической активности бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 13–20. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-13-20

**For citation:**

Krushelnitskaya E.A. Evaluation of photocatalytic activity of concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 13–20. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-13-20

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35

**\*Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: roruri@rambler.ru

## ОДЕЖДА ЕЗДОВОГО ПОЛОТНА МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

**Аннотация.** Затронута актуальная тема надежности мостовых сооружений в современных условиях и роль конструктивных слоёв ездового полотна (дорожной одежды) в повышении и сохранении их эксплуатационной надежности и долговечности. Рассмотрены существующие типовые конструкции одежды ездового полотна и материалы, используемые для их устройства. Анализ и систематизация информации из российских и зарубежных источников по устройству одежды ездового полотна указывает на перспективность и технико-эксплуатационные преимущества использования литых асфальтобетонных смесей в верхних слоях мостового покрытия. Отмечается, что эффективное дорожное покрытие из данного материала способно сопротивляться действующим нагрузкам с учетом специфики работы асфальтобетонного покрытия в течение установленного срока службы, дополнительно выполняя защитную гидроизоляционную функцию металлоконструкций мостового сооружения. Анализ литературы демонстрирует, что активные научные исследования по разработке и созданию эффективных литых асфальтобетонных смесей, в первую очередь, связаны с производством и модифицированием её битумной части, как среды способной иницировать «самозалечивание» композита, самостоятельно ликвидируя структурные дефекты. Богатый опыт различных способов модификаций битумных вяжущих, накопленный за последние несколько десятков лет, позволяет прогнозировать перспективность использования в конструктиве ездового полотна мостовых сооружений литых асфальтобетонов, на основе улучшенных вяжущих, с целью создания новых качественных материалов, способных повысить качество состояния сети мостов в стране.

**Ключевые слова:** мостовые конструкции, ездовое полотно, литой асфальтобетон.

**Введение.** На сегодняшний день актуальной проблематикой транспортной сети является аварийное и предаварийное состояние мостов и путепроводов. Автодорожная артерия страны в целом включает 71 тыс. мостов и путепроводов, на региональных дорогах – 64 тыс. таких объектов, из них более 7 % мостов нуждается в ремонте и восстановлении [1]. Причем многие транспортные мосты были построены более полувека назад, и по причине снижения прочности мостовых конструкций, в последнее время, участились случаи обрушений и аварий инженерных сооружений. Если верить источникам [2], то за 2018 г. рухнувших мостов было 18, а с учетом пешеходных – более 100, в 2019 году обрушилось 10 сооружений. В 2020 г. за полгода вышли из строя порядка 5-ти мостов. Последствия разрушений вызывают смертельные исходы с участниками движения, существенные потери для экономики, а также значительные неудобства для населения. На фоне этих событий, в конце февраля 2020 г. на заседании Правительства была одобрена программа ремонта аварийных и ветхих мостов, в которую должно войти более 2 тыс. объектов [3]. Однако для достижения максимального положительного эффекта от ремонта и реконструкции инженерных сооружений необходимо учитывать предыдущий опыт их эксплуатации и принимать во внимание основные факторы, влияющие на долговечность и надежность инженерных сооружений.

**Основная часть.** Надёжность мостового сооружения во многом зависит от принятого конструктивного решения на стадии проектирования (правильной конструкции фундаментов, опор, пролётных строений) и качества исполнения проектного решения. Помимо этого, при строительстве мостовых и искусственных сооружений требует повышенного внимания конструкция и надежность дорожного полотна, так как его состояние обуславливает не только удобство и безопасность движения автотранспорта, но и эксплуатационную надёжность, а также долговечность всего транспортного объекта.

В основном при строительстве мостовых сооружений несущие элементы пролетного строения устраиваются из стали или железобетона. В частности, от типа используемого материала зависит конструкция и технология устройства будущей дорожной одежды. Несмотря на разнообразие материалов и технологий устройства мостового полотна [4–14], существует принципиальная схема конструкции дорожной одежды, состоящая из четырех основных слоёв, каждый из которых выполняет свою функцию, рисунок 1.

Нередко мостовое полотно, включающее проезжую часть, полосы безопасности и тротуары, называют «ездовым полотном». В ОДМ 218.2.002-2009 «Методические рекомендации по применению современных материалов в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами мостовых сооружений» термин «одежда

ездового полотна (дорожная одежда) означает конструктивный элемент мостового полотна, включающий в себя все слои, уложенные поверх плит проезжей части или мостового настила (выравнивающий слой, гидроизоляция, защитный

слой, покрытие)». И, несмотря на то, что для нас наиболее привычен термин дорожная одежда, в дальнейшем в работе будет использовано словосочетание «ездовое полотно».

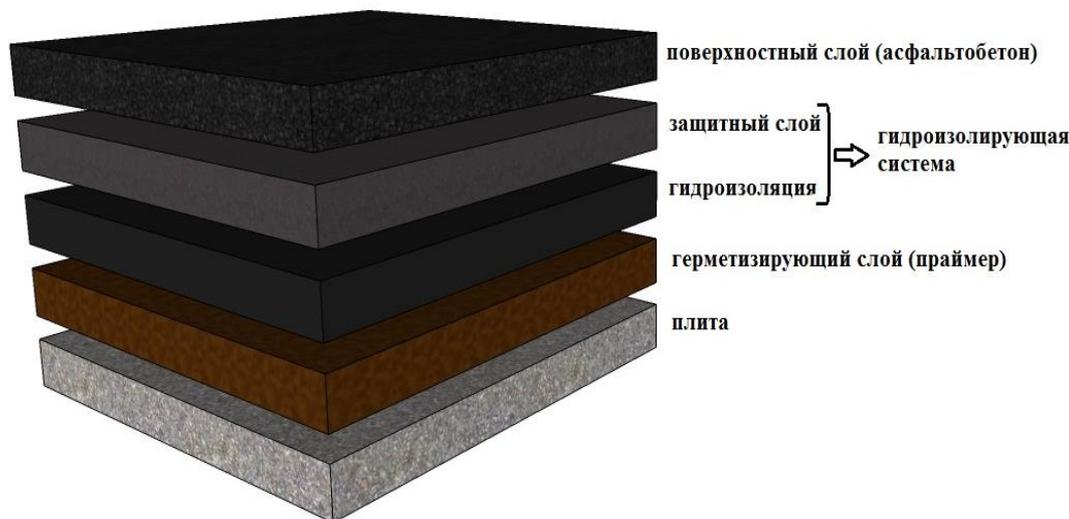


Рис. 1. Общая схема одежды ездового полотна

Одежда ездового полотна, устраиваемая на плитах проезжей части мостового сооружения выполняет следующие функции: воспринимает и передаёт динамическую нагрузку от движущегося транспорта на нижние конструктивные слои, стремится к упругому восстановлению после прекращения деформаций, обеспечивает комфортное и безопасное движение автотранспорта посредством обеспечения сцепления колес с ездовым покрытием. В случае рассмотрения конструктивного слоя ездового покрытия необходимо понимать, что к числу важнейших функций относится защита мостовых конструкций от поверхностной воды. Конструктивные слои одежды ездового полотна должны соответствовать основным требованиям, изложенным в ОДМ 218.3.074-2019 «Рекомендации по применению современных конструктивных решений и технологий по устройству дорожных одежд на мостах для повышения срока службы». Важным аспектом в обеспечении совместной работы покрытия с плитой проезжей части, предотвращении отслаивания и сдвига покрытия относительно плиты является их хорошее сцепление между собой. При этом основополагающей функцией дорожной одежды ездового полотна является защита от агрессивных внешних воздействий плиты проезжей части. Так же, этот важный конструктивный элемент, контактирующий с внешней эксплуатационной средой, должен быть устойчив к трещинообразованию, и не восприимчив ко всем видам воздействий и нагрузок.

Возведение дорожной одежды осуществляется в несколько этапов. Перед нанесением герметизирующего слоя поверхность стальной или железобетонной плиты очищают и подготавливают. Герметизирующий слой на металлической плите позволяет избежать преждевременной коррозии элементов, выступает в качестве замка, обеспечивающего плотное прилегание и фиксацию гидроизоляции к ортотропной плите, а также драйвера для пролонгации службы покрытия ездового полотна и его устойчивости к усталостным разрушениям [4, 5, 11]. Достижение обозначенных эффектов становится возможным посредством минимизации вероятности образования любых свободных полостей на границе раздела мостовых бетонных элементов с другими слоями.

Нанесение грунтовки является базовой операцией перед устройством гидроизолирующей системы, включающей в себя слои гидроизоляции и защитный (рис. 1). Работоспособность и долговечность мостовых конструкций прямо пропорциональны качеству гидроизоляции. Тщательный подход к данной технологической операции минимизирует диффундирование осадков и противогололедных жидкостей внутрь конструктивных элементов моста и является элементом пассивной защиты от преждевременной коррозии металла в мостовом сооружении во время замораживания-оттаивания. Использование двухслойной системы гидроизоляции способствует максимальной герметизации конструк-

ции, снижает вероятность намокания и гарантирует получение водонепроницаемого конструктива.

В соответствии с ОДМ 218.3.074-2019 гидроизолирующие материалы бывают трех основных категорий:

- наклеиваемые рулонные;
- распыляемые;
- мастичная гидроизоляция.

Защитный слой в большинстве случаев представляет собой прослойку из литого асфальтобетона, который также используется в качестве второго слоя гидроизоляции. Основное назначение защитного слоя на металлической ортотропной плите проезжей части, также, как и у гидроизоляционного слоя - защищать стальные элементы от коррозии и, дополнительно, обеспечивать плавную передачу и перераспределение нагрузки. Следовательно, он должен быть устойчив к действию нефтепродуктов, топлива, воды, минеральных солей и не восприимчив к погодным условиям.

В соответствии с нормативными документами в качестве поверхностного слоя рекомендуется применять литой полимерасфальтобетон, мелкозернистый горячий асфальтобетон, стале-

фибробетон, тонкослойные полимерные покрытия, цементобетон или щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА).

Как было сказано выше, мостовые конструкции в основном выполняют из стальных или железобетонных материалов. Ввиду того, что конструктивные элементы мостов, выполненные из стали склонны к значительным деформациям ортотропной плиты в теле проезжей части, мониторинг усталостных разрушений, возникающих в слоях ездового полотна, выполненных из асфальтобетона, является ключевым в перечне работ по содержанию мостовых переходов. Специфика работы одежды ездового полотна на мостовых сооружениях накладывает ряд серьезных ограничений и требований при разработке такого конструктива и, в первую очередь, необходимо равновесие между способностью материала к сопротивлению различным воздействиям в покрытии и проявлению остаточных деформаций в виде колебности и образованию трещин [5]. Кроме того, при устройстве долговечного мостового сооружения полный вес конструкции должен стремиться к минимуму, а надежность и работоспособность к максимуму. В общем виде конструкция ездового полотна на ортотропной плите представлена на рисунке 2.

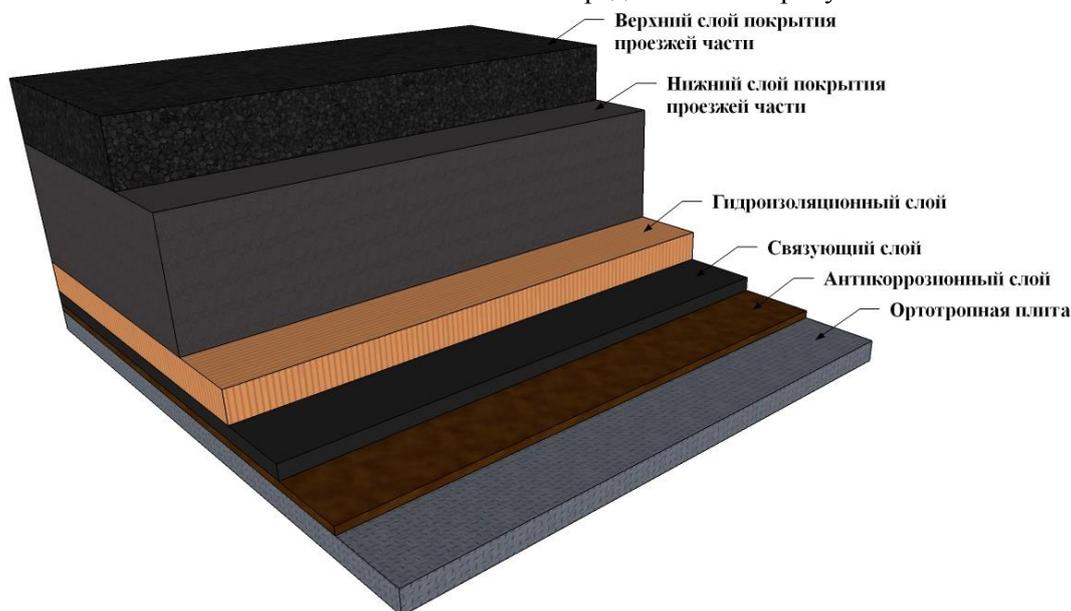


Рис. 2. Конструкция ездового полотна на ортотропной плите проезжей части мостовых сооружений

В 100 лет принято оценивать прогнозируемый срок службы железобетонных мостов. Однако, попеременное замораживание/оттаивание, действие агрессивных сред и истирание, активизируют процессы коррозии арматуры мостов из железобетона, подвергая их ранней деструкции [5]. В свете этого, необходимость применения превентивных мер по исключению попадания на арматуру влаги, содержащей агрессивные соли -

очевидна. Одним из ключевых условий обеспечения длительного срока службы сооружения является тандем из высококачественной гидроизоляции и асфальтобетона ездового полотна [5]. Считается, что проектировать асфальтобетонную смесь для проезжей части, опирающейся на железобетонные плиты, легче ввиду их большой жесткости. Типовые конструкции подобной одежды ездового полотна приведены на рисунке 3.

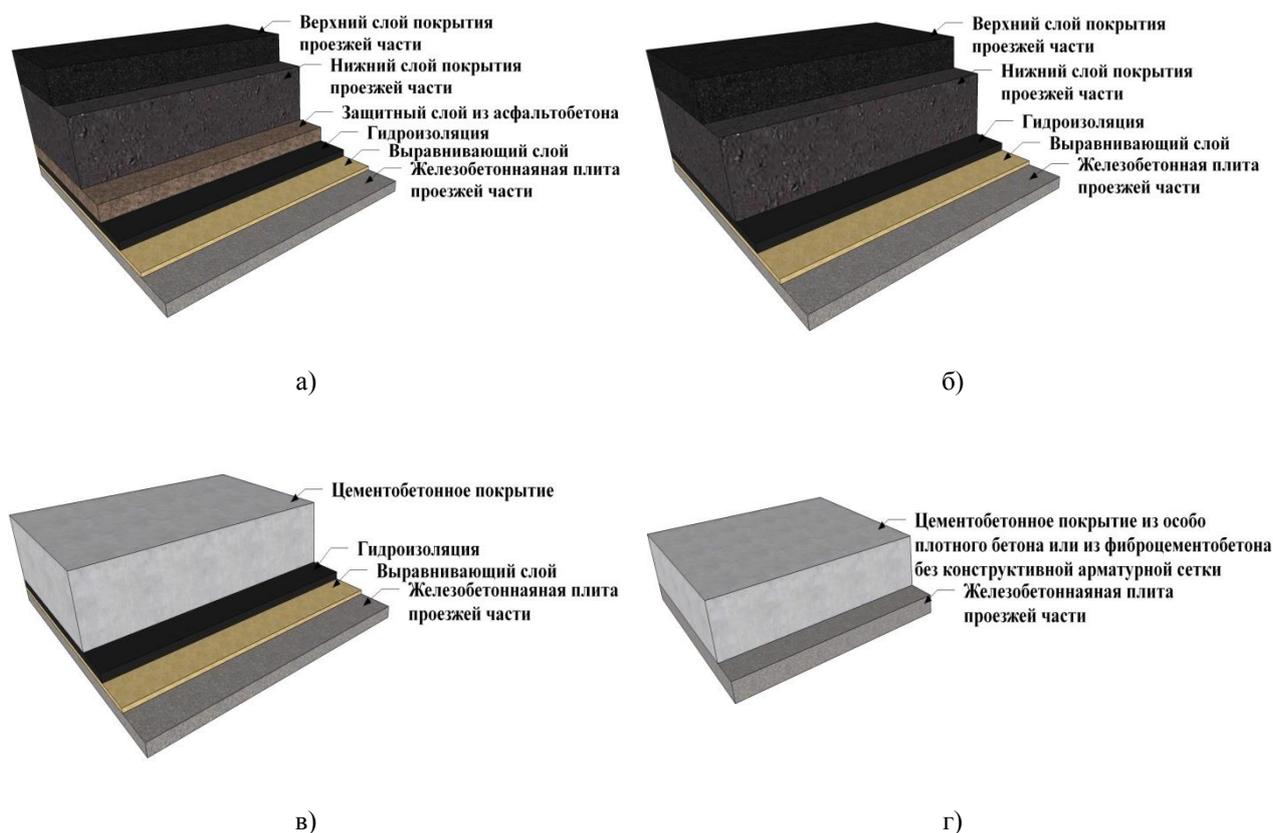


Рис. 3. Конструкция одежды ездового полотна на железобетонной плите проезжей части мостовых сооружений: а) асфальтобетонное покрытие, уложенное на защитный слой из бетона; б) асфальтобетонное покрытие, уложенное на гидроизоляцию; в) цементобетонное покрытие; г) цементобетонное покрытие из особо плотного бетона, выполняющего гидроизолирующие функции, или из фиброцементобетона, поверх которых устраивается покрытие

На сегодняшний день не придумано материалов, которые достаточно хорошо зарекомендовали бы себя в работе, как при положительных, так и при значительных отрицательных температурах окружающего воздуха. Но, как показывает практика, применение литого асфальтобетона при строительстве ездового полотна на мостовых сооружениях способно обеспечить долговечность всего конструктива и соответствовать предъявляемым требованиям эффективней, чем другие типы покрытий.

Главный недостаток литого асфальта, по сравнению с другими видами асфальтобетона, заключается в том, что его производство и укладка более энергозатратный и трудоемкий процесс. При устройстве верхнего слоя из литого асфальтобетона дополнительно требуется проведение поверхностной обработки, так как материал способен сравнительно быстро потерять требуемую шероховатость. Однако щебень, распределенный по уложенному литому асфальтобетонному слою, под действием колес движущихся транспортных средств втапливается не весь. Это приводит к тому, что оставшийся на покрытии щебень, попадая под колеса автомобилей, может попасть в ветровые стекла автотранспорта, приводя

к негативным последствиям. Однако литой асфальтобетон обладает рядом преимуществ, оправдывающих эффективность его применения в дорожном строительстве. Литой асфальтобетон, как правило, обладает высокой пластичностью, прочностью, более эластичными свойствами и способен испытывать большие деформации, что позволяет отнести его к материалам с эффектом самозалечивания, без появления внешних дефектов. Также, есть мнение [5], что сцепление литого асфальтобетона с конструктивными слоями, расположенными ниже лучше, чем у традиционного асфальтобетона. Приготовление литой асфальтобетонной смеси в основном не отличается от приготовления традиционных горячих смесей, все компоненты перемешиваются в обычных смесителях. Отличие заключается в повышенной технологической температуре (смесь на выходе  $\approx 200$  °С) и увеличенных сроках приготовления (выше на 25-50 %) [7]. Согласно ГОСТ Р 54401-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси литые асфальтобетонные дорожные горячие и асфальтобетон литой дорожный. Технические условия» приготовленные литые смеси должны транспортироваться к месту укладки в специальных кохерах. В кохерах осуществляется непрерывное перемешивание

смеси с одновременным ее подогревом, это необходимо для предотвращения процесса расслаивания литой асфальтобетонной смеси и сохранения её однородности во время транспортировки.

Технические и технологические преимущества литого асфальтобетона были оценены в ряде стран западной Европы. В соответствии с публикациями [8, 12–13], этот композитный материал широко применяется как устройства асфальтобетонных покрытий мостов и мостовых переходов, а также их ямочного ремонта. Эффективность использования литого асфальтобетона в мостостроении [13] обусловлена спецификой его свойств, а именно: морозостойкостью, сдвигоустойчивостью, износостойкостью, эластичностью, водостойкостью, долговечностью и т.д. Более того, с недавних пор набирают популярность технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов [15–23], направленные на восстановление собственной функциональности в конструктивном элементе. Стоит отметить, что вариативность свойств литого асфальтобетона и опыт наблюдения за его поведением при работе в конструктиве позволяет отнести его к «самовосстанавливающимся» материалам, что также добавляет актуальности для его изучения и использования.

В России, до недавнего времени, на мостовых сооружениях активно выполнялись работы по устройству конструкции дорожной одежды в соответствии с СТО 49976959.001–2011 «Устройство конструкции дорожной одежды на мостовых сооружениях по технологии «Лемминкяйнен»» по финской технологии «Лемминкяйнен», разработанной одноименной компанией «Лемминкяйнен Дор Строй». Уникальность данной технологии заключается в используемых материалах и разработанных схемах конструкции дорожных одежд на их основе (рис. 4, 5). В качестве гидроизоляционного слоя рекомендовалась мастика «Леммастикс» [24], а укладка верхнего слоя покрытия толщиной 40 мм осуществляется из литого асфальта «Лемпруф», выполненного на полимерно-битумном вяжущем. На заключительном этапе технология устройства ездового полотна предусматривала втапливание черного щебня фракции 12–16 или 10–20 мм. Это позволяло литым асфальтобетонным смесям «Лемпруф» отличаться высокой износостойкостью и трещиностойкостью при отрицательных температурах [24].

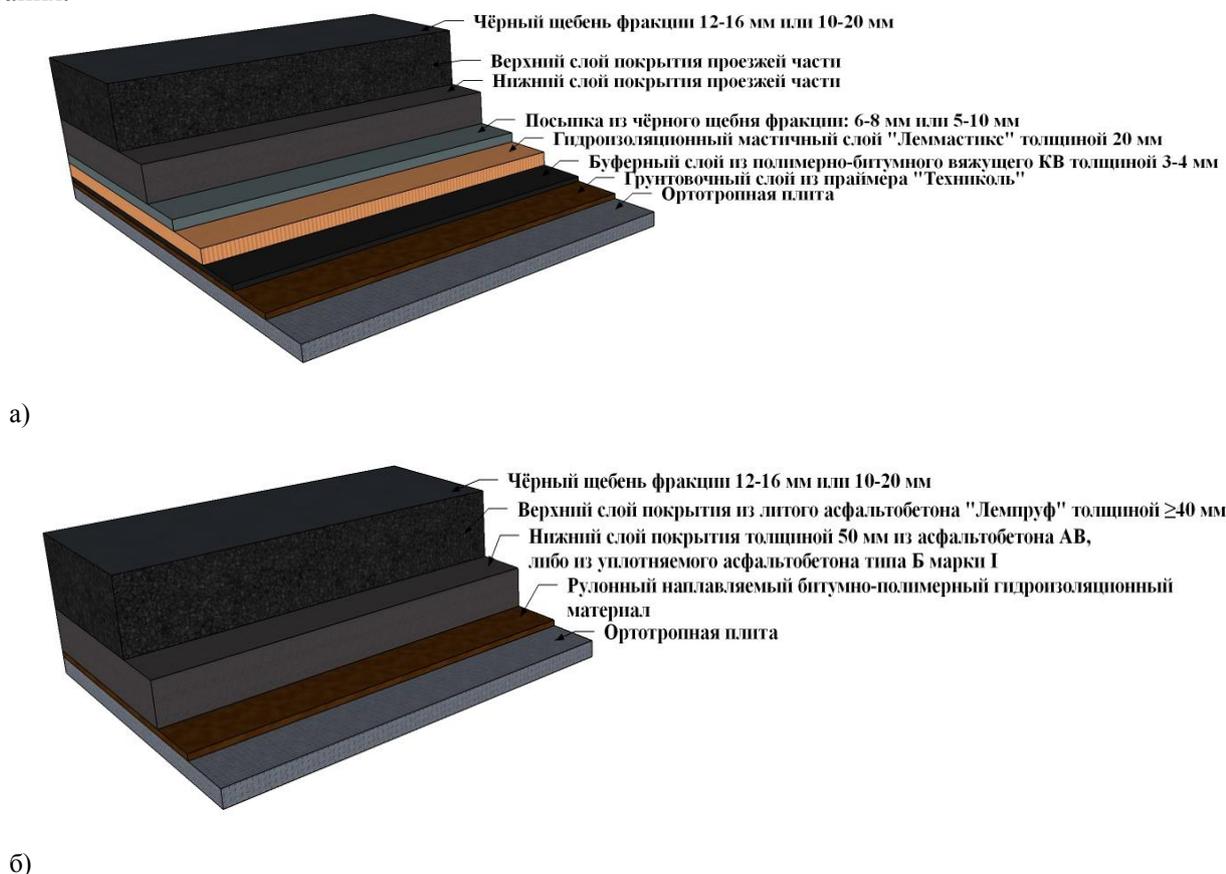


Рис. 4. Конструкция дорожной одежды на стальной ортогтропной плите проезжей части по технологии «Лемминкяйнен»:

а) стандартная технология; б) с защитно-сцепляющим слоем из наплавляемого рулонного гидроизоляционного материала

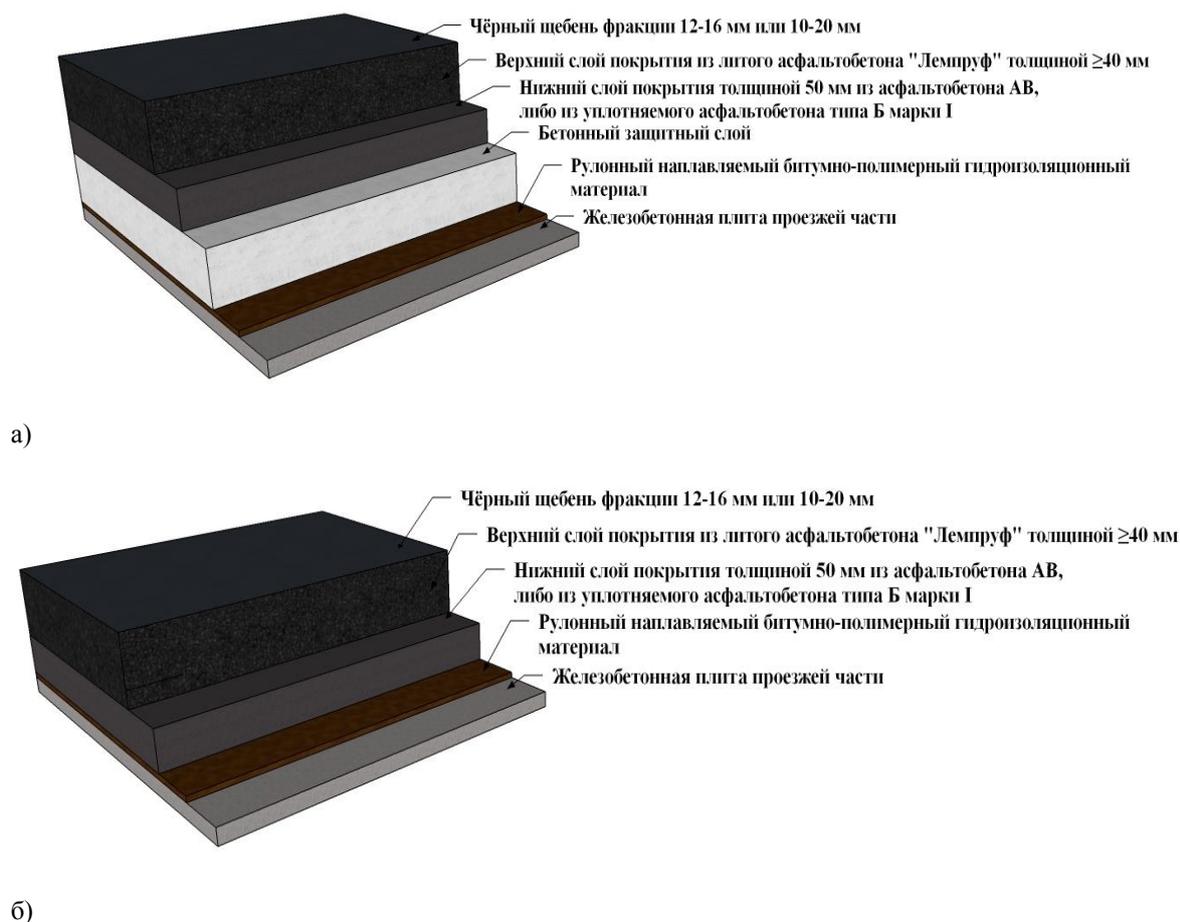


Рис. 5. Конструкция дорожной одежды на железобетонной плите:  
а) стандартная технология; б) с гидроизоляцией из рулонных наплавляемых материалов

Подобный подход компании к выбору материала для устройства одежды ездового полотна мостового сооружения обусловлен тем, что дорожное покрытие, устраиваемое из литого асфальтобетона, обладает низкой остаточной пористостью (материал при остывании способен достигать максимальной плотности без образования пор). Гарантированная удобоукладываемость литой асфальтобетонной смеси при технологической температуре, обусловлена значительным содержанием органического вяжущего и минерального порошка. За счёт этого при устройстве и ремонте покрытий исключается работа катков, ведь уплотнение происходит в основном под действием собственного веса асфальтобетона, что особенно актуально при выполнении работ на мостах [25–26]. В отдельных случаях могут использоваться легкие ручные катки.

Остановимся более подробно на этом конструктивном материале для одежды ездового полотна мостового сооружения. В соответствии с ГОСТ Р 54401—2020 «Смеси литые асфальтобетонные дорожные горячие и асфальтобетон литой дорожный», литая асфальтобетонная смесь – это рационально подобранная смесь вязко-текучей консистенции с минимальным содержанием воздушных пустот, состоящая из минеральной

части (щебня, песка и минерального порошка) и битумного вяжущего, взятых в определенных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии. Для приготовления литых смесей в качестве вяжущего применяют битумы нефтяные дорожные вязкие марок БНД 35/50, БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования». Однако, при использовании рядового битума в составе литого асфальтобетона, предназначенного для устройства верхних слоёв покрытия, существует риск возникновения пластических деформаций, что связано с недостаточной жесткостью материала, при использовании такого вида вяжущего. Поэтому, одним из направлений исследований в дорожном строительстве является разработка и применение литых асфальтобетонных смесей, на основе модифицированных вяжущих [27–56].

Существует значительное число разработок по созданию специальных композитных вяжущих, предназначенных для повышения сроков службы дорожного покрытия. Самыми распространенными модификаторами дорожного битума являются каучукоподобные добавки (полибутадиеновый, натуральный, бутилкаучук, хло-

ропрен), органо-марганцевые компаунды, термопластичные полимеры (полиэтилен, полипропилен, полистирол, этилен-винилацетат), термопластичные каучуки (полиуретан, олефиновые сополимеры, а также блоксополимеры стирол-бутадиен-стирола) [26–41]. Главная задача добавок – создание пространственной эластичной структурной сетки в битуме, для этого в основном используют термоэластопластичные полимеры типа СБС (стирол-бутадиен-стирол), но в некоторых странах, как, например, во Франции, для этих целей применяется ЭВА (этилен-винил-ацетат) [41]. Анализ производственного опыта показывает, что по сравнению с литыми асфальтобетонами, приготовленными на основе традиционного вязкого битума, использование битумов, модифицированных полимерами класса термоэластопластов, в составе литого асфальтобетона способствует уменьшению значения показателя погружения штампа. Поэтому такие добавки вводятся в основном для повышения температурной устойчивости литого асфальтобетона. Помимо этого, приготовление литых асфальтобетонных смесей на модифицированном битуме приводит к снижению расхода битумного вяжущего на 15–20 % [28, 41]. Однако стоит отметить, что использование полимерно-битумных вяжущих усложняет технологию приготовления литой асфальтобетонной смеси из-за необходимости повышения температуры её нагрева, так как снижение температуры смеси на модифицированных битумных вяжущих резко ухудшается её удобоукладываемость.

Известны разработки [42–48] по модификации литого асфальтобетона путём введения в битум технической серы, что позволяет уменьшить температуру приготовления и укладки смеси (с 220–250 до 140–150 °С), без потери удобоукладываемости с одновременным повышением сдвигоустойчивости и трещиностойкости. В таких смесях сера, обладая высокими адгезионными свойствами, осуществляет связку битума и щебня с положительно и отрицательно заряженными микрочастицами поверхности по всей геометрии скола [48]. Та часть серы, которая не прореагировала с битумом, способна создавать в литой асфальтобетонной смеси прочные механические связи, что улучшает качество слоёв покрытия. В традиционных асфальтобетонных смесях этого не происходит из-за разрушения кристаллических связей под действием катков во время укладки смеси [48].

Наиболее эффективным способом повышения качества литой асфальтобетонной смеси, по мнению авторов [49–50], является комплексное регулирование макро-, мезо- и микроструктуры композита. Совместное модифицирование органического вяжущего и поверхностная активация минерального материала способствуют формированию эластичной матрицы и прочной связи на

поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал» [50].

Активно ведутся исследования по введению резиновой крошки, как в битум, так и в литую асфальтобетонную смесь на стадии её приготовления. Причем её уникальность заключается в том, что, как все модификаторы, резина становится частью связующего материала, сокращает расход битумного вяжущего в смеси, а также выступает как компонент наполнителя. Фактически резиновая крошка заменяет собой некоторые мелкозернистые фракции минерального материала. Авторы [51–55] в своих исследованиях пришли к выводу, что наиболее высокие и стабильные показатели качественных характеристик асфальтобетона, гарантирующие его эффективное применение в строительстве долговечных покрытий, обеспечивает введение модификатора на основе резиновой крошки путем приготовления, резинобитумного вяжущего (РБВ). Главное преимущество использования резины заключается в повышении трещиностойкости, сдвигоустойчивости и коррозионной устойчивости покрытий из литой смеси, а также увеличении их эксплуатационной долговечности и продлении сроков службы. Стоит отметить, что вышеупомянутая компания «Лемминкяйнен Дор Строй» производила свой асфальт «Лемпруф» на резинобитумном вяжущем, что проецируется на стойкость асфальта к большим перепадам температур.

На основании выполненного анализа существующего мирового опыта [29–62] по технологии приготовления и ведения работ с литым асфальтобетоном можно предположить, что существует возможность сокращения времени приготовления литого асфальтобетона путем разработки новой технологии, которая подразумевает возможность введения модификаторов в состав литой смеси во время её транспортировки на объект в кохерах.

**Выводы.** В работе затронута тема актуальности разработки конструктивных слоев для одежды ездового полотна мостовых сооружений как превентивной меры по увеличению надежности и долговечности транспортных объектов. Рассмотрены основные типовые конструкции и материалы дорожной одежды ездового полотна, применяемые на практике в РФ. Анализ существующих способов устройства и ремонта одежды ездового полотна мостов демонстрирует преимущества использования литых асфальтобетонов для получения качественных покрытий, способных сопротивляться действующим нагрузкам с учетом специфики работы асфальтобетонного покрытия.

Можно отметить, что активный научный поиск по созданию эффективных литых асфальтобетонов реализуется, в первую очередь, посредством разработки и модифицирования битумной

части, как среды иницирующей «самозалечивание» композита.

Функциональная эффективность литого асфальтобетона в конструктиве ездового полотна мостовых сооружений и широкая вариативность модификаций битумного вяжущего для него позволяют предположить перспективность и актуальность этого направления строительного материаловедения, обусловленные неудовлетворительным состоянием сети мостов в стране.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимир Афонский: Мостовые сооружения - жизненно важная часть транспортной инфраструктуры страны [Электронный ресурс]. Фракция «Единая Россия» в Государственной Думе. URL: <http://er-gosduma.ru/news/vladimir-afonskiy-mostovye-sooruzheniya-zhizненно-vazhnaya-chast-transportnoy-infrastruktury-strany> (дата обращения: 07.01.2020)
2. Чайковская А. С начала года в России обрушилось 5 транспортных мостов [Электронный ресурс]. ПолитРоссия. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/243531103> (дата обращения: 07.01.2020)
3. Одобрена программа ремонта и строительства аварийных мостов и путепроводов. [Электронный ресурс]. Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9432> (дата обращения: 07.01.2020)
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Дорожная одежда на мостовых сооружениях: отечественный и зарубежный опыт // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Выпуск 5(24). С. 1–30.
5. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Телегин М.А., Хохлов С.В. Эффективные конструкции дорожных одежд с применением асфальтобетона на мостовых сооружениях // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Выпуск 1. С. 1–18.
6. Зинченко Е.В., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д. Сравнительный анализ применяемых конструкций дорожной одежды мостовых сооружений обхода г. Сочи, сданных в эксплуатацию до начала строительства Олимпийских объектов Часть 1. Характеристики мостовых сооружений // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Выпуск 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primenyaemykh-konstruktsiy-dorozhnoy-odezhdy-mostovykh-sooruzheniy-obhoda-g-sochi-sdannykh-v-ekspluatatsiyu-do-nachala-1> (дата обращения: 17.02.2021).
7. Зинченко Е.В., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д. Сравнительный анализ применяемых конструкций дорожной одежды мостовых сооружений обхода г. Сочи, сданных в эксплуатацию до начала строительства Олимпийских объектов Часть 2. Основные повреждения дорожной одежды мостового полотна // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Выпуск 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primenyaemykh-konstruktsiy-dorozhnoy-odezhdy-mostovykh-sooruzheniy-obhoda-g-sochi-sdannykh-v-ekspluatatsiyu-do-nachala> (дата обращения: 17.02.2021).
8. Покровский А.В. Краткий обзор опыта применения литых полимерасфальтобетонов на искусственных сооружениях в северо-западном регионе РФ // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Выпуск 5 (24). С. 1–22.
9. Васильев Ю.Э. Литой асфальтобетон для конструкций дорожной одежды мостового полотна // Строительные материалы. 2010. № 10. С. 49–53.
10. Васильев Ш.Н., Смоленкин В.С. Особенности работы покрытия проезжей части в зоне деформационных швов мостовых сооружений // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. 3. С. 1–8.
11. Беляев Н., Мамаев Н., Овчинников И., Соколов А., Шипитько Ф. Дорожные одежды для мостовых сооружений // Дороги. Инновации в строительстве. 2016. №56. С. 95–103.
12. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Телегин М.А., Хохлов С.В. Применение асфальтобетонных покрытий на мостах (иностранный опыт) // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2014. № 1. С.110–131.
13. Тазетдинов А.А. Применение литого полимерного асфальтобетона для устройства дорожных одежд на мостах: преимущества, недостатки, особенности приготовления, транспортировки, укладки. Опыт применения // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 41.
14. Распоров О.Н., Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Распоров К.О. Семнадцать лет эксплуатации мостового перехода через Волгу у села Пристанное Саратовской области // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2017. Том 4. №1.
15. Иноземцев С.С., До Тоан Чонг Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // Вестник МГСУ. 2020. Т.15. № 10. С. 1407–1424.
16. Vysotskaya M.A., Barkovsky D.V., Shekhovtsova S.Yu. Nanosized Carbon Modifier Used to Control Plastic Deformations of Asphalt Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 032060.
17. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures // Materials and Structures. 2019. № 52(4).
18. Xu Sh., Garcia A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E. Self-healing asphalt review: from

idea to practice // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5. Issue 17. P. 1800536.

19. Garcia A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic // *Fuel*. 2012. Vol. 93. Pp. 264–272.

20. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt // *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. Pp. 563–571.

21. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 135. Pp. 641–649.

22. Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R. A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 771–779.

23. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M. Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. Issue 7. Pp. 880–885.

24. Заливаемые резинобитумные материалы фирмы «Лемминкяйнен» для изоляции и покрытия мостов [Электронный ресурс]. Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/50/50129> (дата обращения: 07.01.2020)

25. Буров В.В., Вовко В.В., Акчурин Т.К. Технологии литого асфальтобетона и оценка транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог // *Вестник ВолгГАСУ*. 2011. Вып. 25 (44). С. 105–109.

26. Маргайлик Е. Технологии устройства дорожных покрытий из литого асфальтобетона [Электронный ресурс]. Строительство и недвижимость. URL: <https://nestor.minsk.by/sn/1998/34/sn83414.htm> (дата обращения: 07.01.2020)

27. Худякова Т.С. Полимерно-битумное вяжущее: особенности структуры и свойств [Электронный ресурс]. GlobeCore. URL: <https://bitumen.globecore.ru/bitumen-polimer-vyazkie> (дата обращения: 07.01.2020)

28. Полимерно-модифицированное вяжущее: дорожные битумы [Электронный ресурс]. GlobeCore. URL: <https://bitumen.globecore.ru/pmbv> (дата обращения: 07.01.2020)

29. Klucher Robert H. Some Thoughts About Gussasphalt Surface Courses // *Public Works*. 1973. № 104 (9). Pp. 100–102.

30. Der Wetter W. Pavement Layers of Asphalt Concrete or Mastic Asphalt [Deckschichten aus Asphaltbeton oder Gussasphalt] // *Strassen- und Tiefbau*. 1983. № 37 (12). Pp. 1–12.

31. Xin C., Lu Q., Ai C., Rahman A., Qiu Y. Optimization of hard modified asphalt formula for

gussasphalt based on uniform experimental design // *Construction and Building Materials*. 2017. Volume 136. Pp. 556–564.

32. Isacsson U., Zeng H. Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt // *Mat. Struct.* 1998. № 31. Pp. 58–63.

33. Sang L., Zhendong Q., Xu Ya., Hui W. Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics and mixtures // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 156. Pp. 131–141.

34. Dong F., Zhao W., Zhang Y., Fan W., Wei J., Luo H., Meng L. The high temperature performance and microstructure of TLA modified asphalt // *Petroleum Science and Technology*. 2018. № 36 (7). Pp. 481–486.

35. Tae W.K., Jongeun B., Hyun Jo.L., Ji Yo. Ch. Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. m48. Pp. 908–916.

36. Jueshi Q, Qinzhen W., Wenjun W., Hua Zh. Fatigue performance of gussasphalt concrete made from modified AH-70 asphalt // *Materials & Design (1980-2015)*. 2013. Vol. 52. Pp. 686–692.

37. Hongliang Zha., Gaowang Zha., Feifei H., Zengping Zha., Wenjiang Lv. A lab study to develop a bridge deck pavement using bisphenol A unsaturated polyester resin modified asphalt mixture // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159. Pp. 83–98.

38. Zou G., Xu X., Li J., Yu H., Wang C., Sun J. The Effects of Bituminous Binder on the Performance of Gussasphalt Concrete for Bridge Deck Pavement // *Materials*. 2020. № 13. Pp. 364.

39. Ke Zho, Mingzhi S., Shengkai S. Study on Improvement of Aging Performance for Gussasphalt Modified by Reclaiming Agent // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019.

40. Sang L., Zhendong Q., Xu Ya., Qing L. Laboratory Evaluation of Double-Layered Pavement Structures for Long-Span Steel Bridge Decks // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. № 30(6). Pages 04018111.

41. Котляревский А.А., Королев С.А., Вовко В.В., Акчурин Т.К. Оценка эффективности ремонта и строительства автомобильных дорог на примере технологии литого асфальтобетона // *Вестник ВолгГАСУ*. 2006. № 6. С. 125–127.

42. Маргайлик Е. Актуальность производства серобетона и серобитума. Использование серы в дорожном строительстве США, Канады, Франции, Польши [Электронный ресурс]. ООО «Верное решение». URL: <https://xn---dtbhaacat8bfloi8h.xn--p1ai/serobeton-actual> (дата обращения: 07.01.2020)

43. Дошлов О.И., Калапов И.А. Новые дорожные битумы на основе органического вяжущего, модифицированного технической серой и полимерными добавками // Вестник ИрГТУ. 2015. №11 (106). С. 107–111.
44. Демина А.В. Использование серы для модификации асфальтобетона [Электронный ресурс]. URL: <https://www.newchemistry.ru/printletter.php?id=5401> (дата обращения: 07.01.2020)
45. Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Тимохин Д.К., Репин А.М., Репина О.В., Талалай В.В. Производство и применение сероасфальтобетонных композиционных покрытий на автомобильных дорогах и мостах // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т.3, № 3. С. 1–10.
46. Галдина В.Д., Серобитумные вяжущие: монография. Омск: СибАДИ, 2011. 124 с.
47. Tomkowiak K., Zelinski K. Wplyw dodatku sidrky do asphaltow // Drogownictwo. 1983. №2. Pp. 55–59.
48. Загородняя А. В. Теоретические закономерности формирования структуры литых асфальтополимерсеробетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 4-2 (132). С. 127–132.
49. Братчун В. И., Пактер М.К., Беспалов В.Л., Самойлова Е.Э. Об особенностях формирования граничных слоев на поверхности раздела фаз «минеральный порошок (МП) – модифицированное органическое вяжущее» // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури, Макіївка. 2003. Вип. 1(38). С. 3–8.
50. Беспалов В. Л., Братчун В. И., Ахмет Талиб Мутташар Мутташар. О технологических и физико-механических свойствах асфальтобетона с комплексномодифицированной микро, мезо и макроструктурой // Актуальные проблемы физико-химического материаловедения: сб. тезисов по материалам международной научно-практической конференции, 30 сентября–4 октября 2013 г. г. Макеевка. 2013. С. 92–99.
51. Духовный Г.С., Сачкова А.В. Эффективность применения резинобитумного вяжущего при устройстве асфальтобетонных покрытий // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (34). С. 19–23.
52. Карпенко А.В., Духовный Г.С. Предпосылки и перспективы применения резинобитумного вяжущего // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения), Белгородский государственный университет им. В.Г. Шухова. 2010. С. 267–269.
53. Карпенко А.В., Духовный Г.С., Мирошниченко С. И. Резинобитумное вяжущее, основные показатели и перспективы использования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 22–24.
54. Алексеенко В.В., Балабанов В.Б. Асфальтобетоны на основе битумно-резиновых композиционных вяжущих для дорожного строительства // Вестник ИрГТУ. 2011 №12 (59). С. 112–114.
55. Беспечная А.И. Основные преимущества использования резинобитумной асфальтобетонной смеси при асфальтировании и ремонте дорог [Электронный ресурс]. Всё об асфальтировании URL: <http://www.unidorstroy.kiev.ua/articles-asphalting/rubb-erized-asphalt.html> (дата обращения: 07.01.2020)
56. Веренько В.А., Афанасенко А.А. Высокомодульные асфальтобетоны с повышенным содержанием вяжущего для дорожных покрытий // Вестник ХНАДУ. 2006. №34-35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/high-modular-asphalt-macadam-with-raised-content-of-binding-agent-for-road-carpet> (дата обращения: 10.01.2021).
57. Силкин В.В., Рудакова В.В., Лупанов А.П., Силкин А.В. Литой асфальтобетон. Приготовление, транспортирование и укладка литого асфальтобетона // СТТ: строительная техника и технологии. 2015. № 2(110). С. 60–65.
58. Егорычев А. С., Калгин Ю. И. Обоснование применения битумного вяжущего в литых асфальтобетонных смесях при устройстве и ремонте покрытия проезжей части автодорожного моста // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1(49). С. 72–79.
59. Чебанов М.В. Перспективы использования литого асфальтобетона // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 2332–2336.
60. Макаров В.Н. Конструкция и технология устройства мостового полотна автодорожных мостов с применением литого асфальтобетона и современных деформационных швов (на примере моста через Волгу у села Пристанное Саратовской области) : дис... кандидат. техн. наук. Волгоград, 2003. С. 54–55.
61. Пат. 2114953, Российская Федерация, МПК Е 01 С 7/18, С 04 В 26/26. Способ устройства дорожного и аэродромного покрытия из вибролитой асфальтобетонной смеси и способ проектирования состава вибролитой асфальтобетонной смеси / М.С. Мелик-Багдасаров, Н.А. Мелик-Багдасарова; заявитель и патентообладатель М.С. Мелик-Багдасаров, Н.А. Мелик-Багдасарова. № 96120624/03; заявл. 16.10.1996; опубл. 10.07.1998. 2 с.
62. Онищенко А.Н., Кузьминец Н.П., Прикладовский В.С., Ризниченко А.С., Аксенов С.Ю.

Обоснование конструкции дорожной одежды из асфальтобетона литого гусасфальт повышенной трещиностойкости и колеестойкости для метал-

лического пролетного строения южного мостового перехода через р. Днепр в г. Киеве // Наукові нотатки. 2014. № 45. С. 396–406.

*Информация об авторах*

**Высоцкая Марина Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: roruri@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Курлыкина Анастасия Владимировна**, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: anastasiyakurlykina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Кузнецов Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: xidox@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Ткачева Анна Ивановна**, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: anya.tkacheva31@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила 17.02.2021 г.*

© Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И., 2021

*\*Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V., Kuznetsov D.A., Tkacheva A.I.  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
\*E-mail: roruri@rambler.ru*

## ROAD SURFACE OF THE PAVEMENT COATING BRIDGE

**Abstract.** *The current topic of the reliability of bridge structures in modern conditions and the role of the structural layers of the roadway (road surface) in increasing and maintaining their operational reliability and durability are considered. The existing standard designs of road surface clothing and the materials used for their arrangement are considered. The analysis and systematization of information from Russian and foreign sources on the construction of the clothing of the driving road indicates the prospects and technical and operational advantages of using cast asphalt concrete mixtures in the upper layers of the bridge pavement. It is noted that an effective road surface made of this material is capable of resisting existing loads, taking into account the specifics of the operation of the asphalt concrete surface during the established service life, additionally performing the protective waterproofing function of the metal structures of the bridge structure. The analysis of the literature demonstrates that active scientific research on the development and creation of effective cast asphalt concrete mixtures is primarily associated with the production and modification of its bituminous part, as a medium capable of initiating "self-healing" of the composite, independently eliminating structural defects. The rich experience of various methods of modifying bituminous binders, accumulated over the past few decades, allows to predict the prospects for using cast asphalt concrete in the construction of the roadway of bridge structures, based on improved binders, in order to create new high-quality materials that can improve the quality of the bridge network in the country.*

**Keywords:** *bridge construction, bridge travelled way, cast asphalt.*

### REFERENCES

1. Vladimir Afonskiy: Bridge structures are a vital part of the country's transport infrastructure [Mostovyye sooruzheniya - zhiznenno vazhnaya chast transportnoy infrastruktury strany]. Faction "United Russia" in the State Duma. URL: <http://er-gosduma.ru/news/vladimir-afonskiy-mostovyye-sooruzheniya-zhiznenno-vazhnaya-chast-transportnoy-infrastruktury-strany> (date accessed: 01/07/2020). (rus)

2. Chaikovskaya A. Since the beginning of the year, 5 transport bridges have collapsed in Russia [S

nachala goda v Rossii obrushilos 5 transportnykh mostov]. PolitRussia. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/243531103> (date accessed: 01/07/2020). (rus)

3. The program for the repair and construction of emergency bridges and overpasses was approved [Odobrena programma remonta i stroitelstva avariynykh mostov i puteprovodov]. Ministry of Transport of the Russian Federation. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9432> (date accessed: 07/01/2020). (rus)

4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. Road clothes on bridge structures: domestic and foreign experience [Dorozhnaya odezhda na mostovykh sooruzheniyakh: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt]. *Naukovedenie Internet magazine*. 2014. Issue 5 (24). Pp. 1–30. (rus)
5. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Telegin M.A., Khokhlov S.V. Effective pavement constructions using asphalt concrete on bridge structures [Effektivnyye konstruktsii dorozhnykh odezhd s primeneniym asfaltobetona na mostovykh sooruzheniyakh]. *Naukovedenie Internet magazine*. 2014. Issue 1. Pp. 1–18. (rus)
6. Zinchenko E.V., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D. Comparative analysis of the applied pavement structures of bridge structures bypassing the city of Sochi, commissioned before the start of the construction of Olympic facilities. Part 1. Characteristics of bridge structures [Sravnitelnyy analiz primenyayemykh konstruktsiy dorozhnoy odezhd mostovykh sooruzheniy obkhoda g. Sochi. sdannykh v ekspluatatsiyu do nachala stroitelstva Olimpiyskikh obyektov Chast 1. Kharakteristiki mostovykh sooruzheniy]. *Naukovedenie Internet magazine*. 2014. Issue 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primenaemykh-konstruktsiy-dorozhnoy-odezhdy-mostovykh-sooruzheniy-obhoda-g-sochi-sdannykh-v-ekspluatatsiyu-do-nachala> (date of access: 17.02.2021). (rus)
7. Zinchenko E.V., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D. Comparative analysis of the applied pavement structures of bridge structures bypassing the city of Sochi, commissioned before the construction of the Olympic facilities. Part 2. The main damage to the pavement of the bridge bed [Sravnitelnyy analiz primenyayemykh konstruktsiy dorozhnoy odezhd mostovykh sooruzheniy obkhoda g. Sochi. sdannykh v ekspluatatsiyu do nachala stroitelstva Olimpiyskikh obyektov Chast 2. Osnovnyye povrezhdeniya dorozhnoy odezhd mostovogo polotna]. *Naukovedenie Internet magazine*. 2014. Issue 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primenaemykh-konstruktsiy-dorozhnoy-odezhdy-mostovykh-sooruzheniy-obhoda-g-sochi-sdannykh-v-ekspluatatsiyu-do-nachala> (date of access: 17.02.2021). (rus)
8. Pokrovsky A.V. A brief review of the experience of using cast polymer asphalt concrete on artificial structures in the northwestern region of the Russian Federation [Kratkiy obzor opyta primeniya litykh polimerasfaltobetonov na iskusstvennykh sooruzheniyakh v severo-zapadnom regione RF]. *Naukovedenie Internet journal*. 2014. Iss. 5 (24). Pp. 1–22. (rus)
9. Vasiliev Yu.E. Cast asphalt concrete for pavement structures of the bridge bed [Litoy asfaltobeton dlya konstruktsiy dorozhnoy odezhd mostovogo polotna]. *Stroitelnye materialy*. 2010. No. 10. Pp. 49–53. (rus)
10. Vasiliev Sh.N., Smolenkin V.S. Features of the work of the roadway covering in the zone of expansion joints of bridge structures [Osobennosti raboty pokrytiya proyeezhey chasti v zone deformatsionnykh shvov mostovykh sooruzheniy]. *Internet journal "Science Science"*. 2014. Iss. 3. Pp. 1–8. (rus)
11. Belyaev N., Mamaev N., Ovchinnikov I., Sokolov A., Shipitko F. Road clothes for bridge structures. Roads [Dorozhnyye odezhdyy dlya mostovykh sooruzheniy]. *Construction innovations*. 2016. No. 56. Pp. 95–103. (rus)
12. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Telegin M.A., Khokhlov S.V. Application of asphalt concrete pavements on bridges (foreign experience) [Primeneniye asfaltobetonnykh pokrytiy na mostakh (inostrannyi opyt)]. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2014. No. 1. Pp.110–131. (rus)
13. Tazetdinov A.A. The use of cast polymer asphalt concrete for the construction of road pavements on bridges: advantages, disadvantages, features of preparation, transportation, laying. Application experience [Primeneniye litogo polimernogo asfaltobetona dlya ustroystva dorozhnykh odezhd na mostakh: preimushchestva. nedostatki. osobennosti prigotovleniya. transportirovki. ukladki. Opyt primeniya]. *Technics and technology of transport*. 2019. No. 11. Pp. 41. (rus)
14. Rasporov O.N., Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Rasporov K.O. Seventeen years of operation of the bridge across the Volga near the village of Pristannoe, Saratov region [Semnadsat let ekspluatatsii mostovogo perekhoda cherez Volgu u sela Pristannoye Saratovskoy oblasti]. *Internet magazine "Transport structures"*. 2017. Volume 4. No. 1. (rus)
15. Inozemtsev S.S., Do Toan Chong State and development prospects of the technology of self-healing road materials [Sostoyaniye i perspektivy razvitiya tekhnologii samovosstanavlivayushchikhsya dorozhnykh materialov]. *Vestnik MGSU*. 2020. Vol.15. No. 10.Pp. 1407–1424. (rus)
16. Vysotskaya M.A., Barkovsky D.V., Shekhovtsova S.Yu. Nanosized Carbon Modifier Used to Control Plastic Deformations of Asphalt Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 032060.
17. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2019. No. 52 (4).
18. Xu Sh., Garcia A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E. Self-healing asphalt review: from idea to practice. *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5. Issue 17. 1800536.

19. Garcia A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*. 2012. Vol. 93. Pp. 264–272.
20. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. Pp. 563–571.
21. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 135. Pp. 641–649.
22. Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R. A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 771–779.
23. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M. Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Vol. 25. Issue 7. Pp. 880–885.
24. Poured rubber-bitumen materials of the Lemminkäinen firm for insulation and coating of bridges [Zalivayemye rezinobitumnyye materialy firmy «Lemminkyaynen» dlya izolyatsii i pokrytiya mostov]. Library of normative documentation. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/50/50129> (date accessed: 07/01/2020). (rus)
25. Burov V.V., Vovko V.V., Akchurin T.K. Technologies of cast asphalt concrete and assessment of the transport and operational state of highways [Tekhnologii litogo asfaltobetona i otsenka transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobilnykh dorog]. *Bulletin of VolgGASU*. 2011. Issue. 25 (44). Pp. 105–109. (rus)
26. Margailik E. Technologies for the construction of road surfaces from cast asphalt concrete [Tekhnologii ustroystva dorozhnykh pokrytiy iz litogo asfaltobetona]. *Construction and real estate*. URL: <https://nes-tor.minsk.by/sn/1998/34/sn83414.htm> (date accessed: 01/07/2020). (rus)
27. Khudyakova T.S. Polymer-bitumen binder: features of structure and properties [Polimerno-bitumnoye vyazhushcheye: osobennosti struktury i svoystv]. *GlobeCore*. URL: <https://bitumen.globecore.ru/bitumen-polimer-vyazkie> (date accessed: 07/01/2020). (rus)
28. Polymer-modified binder: road bitumens [Polimerno-modifitsirovannoye vyazhushcheye: dorozhnyye bitумы]. *GlobeCore*. URL: <https://bitumen.globecore.ru/pmbv> (date accessed: 07/01/2020). (rus)
29. Klucher Robert H. Some Thoughts About Gussasphalt Surface Courses. *Public Works*. 1973. No.104 (9). Pp. 100–102.
30. Der Wettren W. Pavement Layers of Asphalt Concrete or Mastic Asphalt [Deckschichten aus Asphaltbeton oder Gussasphalt]. *Strassen- und Tiefbau*. 1983. No. 37 (12). Pp. 11–12.
31. Xin C., Lu Q., Ai C., Rahman A., Qiu Y. Optimization of hard modified asphalt formula for gussasphalt based on uniform experimental design. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 136. Pp. 556–564.
32. Isacsson U., Zeng H. Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt. *Mat. Struct.* 1998. No. 31. Pp. 58–63.
33. Sang L., Zhendong Q., Xu Ya., Hui W. Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 156. Pp. 131–141.
34. Dong F., Zhao W., Zhang Y., Fan W., Wei J., Luo H., Meng L. The high temperature performance and microstructure of TLA modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*. 2018. No. 36(7). Pp. 481–486.
35. Tae W.K., Jongeun B., Hyun Jo.L., Ji Yo. Ch. Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 908–916.
36. Jueshi Q, Qinzhen W., Wenjun W., Hua Zh. Fatigue performance of gussasphalt concrete made from modified AH-70 asphalt. *Materials & Design* (1980-2015). 2013. Vol. 52. Pp. 686–692.
37. Hongliang Zha., Gaowang Zha., Feifei H., Zengping Zha., Wenjiang Lv. A lab study to develop a bridge deck pavement using bisphenol A unsaturated polyester resin modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159. Pp. 83–98.
38. Zou G., Xu X., Li J., Yu H., Wang C., Sun J. The Effects of Bituminous Binder on the Performance of Gussasphalt Concrete for Bridge Deck Pavement. *Materials*. 2020. No. 13. Pages 364.
39. Ke Zho., Mingzhi S., Shengkai S.. Study on Improvement of Aging Performance for Gussasphalt Modified by Reclaiming Agent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019.
40. Sang L., Zhendong Q., Xu Ya., Qing L. Laboratory Evaluation of Double-Layered Pavement Structures for Long-Span Steel Bridge Decks. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. No. 30(6). Pp. 04018111.
41. Kotlyarevsky A.A., Korolev S.A., Vovko V.V., Akchurin T.K. Evaluation of the efficiency of repair and construction of highways by the example of cast asphalt concrete technology [Otsenka effektivnosti remonta i stroitelstva avtomobilnykh dorog na primere tekhnologii litogo asfaltobetona]. *Bulletin of VolgGASU*. 2006. No. 6. Pp. 125–127. (rus)

42. Margailik E. Relevance of production of sulfur concrete and sulfur bitumen. The use of sulfur in road construction in the USA, Canada, France, Poland [Aktualnost proizvodstva serobetona i serobituma. Ispolzovaniye sery v dorozhnom stroitelstve SShA. Kanady. Frantsii. Polshi]. LLC "Right Solution". URL: <https://xn----dtbhaacat8bfloi8h.xn--plai/serobeton-actual> (date accessed: 07/01/2020). (rus)
43. Doshlov O.I., Kalapov I.A. New road bitumen based on organic binder modified with technical sulfur and polymer additives [Novyye dorozhnyye bitumy na osnove organicheskogo vyazhushchego. modifitsirovannogo tekhnicheskoy seroy i polimernymi dobavkami]. Bulletin of ISTU. 2015. No. 11 (106). Pp. 107–111. (rus)
44. Demina A.V. The use of sulfur for the modification of asphalt concrete [Ispolzovaniye sery dlya modifikatsii asfaltobetona]: URL: <https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n-id=5401> (date accessed: 01/07/2020). (rus)
45. Andronov S.Yu., Vasiliev Yu.E., Timokhin D.K., Repin A.M., Repina O.V., Talalay V.V. Production and application of sulfur-asphalt-concrete composite coatings on highways and bridges [Proizvodstvo i primeneniye seroasfaltobetonnykh kompozitsionnykh pokrytiy na avtomobilnykh dorogakh i mostakh]. Naukovedenie Internet journal. 2016. Vol. 3, No. 3. Pp. 1–10. (rus)
46. Galdina V.D. Bituminous binders: monograph [Serobitumnyye vyazhushchiye: monografiya]. Omsk: SibADI, 2011. 124 p. (rus)
47. Tomkowiak K., Zelinski K. Wplyw dodatky sidrky do asfaltow. Drogownictwo. 1983. No. 2. Pp. 55–59.
48. Zagorodnyaya A.V. Theoretical patterns of the formation of the structure of cast asphalt-polymer-silver concretes [Teoreticheskiye zakonomernosti formirovaniya struktury litykh asfaltopolimerserobetonov]. Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2018. No. 4-2 (132). Pp. 127–132. (rus)
49. Bratchun V.I., Pakter M.K., Bepalov V.L., Samoilo E.E. On the features of the formation of boundary layers on the interface between the phases "mineral powder (MP) - modified organic binder". News of Donbass State Academy of Budget and Architecture, Makivka. 2003. Vol. 1 (38). Pp. 3–8.
50. Bepalov V.L., Bratchun V.I., Akhmet Talib Muttashar Muttashar. On technological and physico-mechanical properties of asphalt concrete with a complex modified micro, meso and macrostructure [O tekhnologicheskikh i fizikomekhanicheskikh svoystvakh asfaltobetona s kompleksnomodifitsirovannoy mikro. mezo i makrostrukturoy]. Actual problems of physical and chemical materials science: collection of articles. abstracts based on the materials of the international scientific and practical conference, September 30 – October 4, 2013, Makeevka. 2013. Pp. 92–99. (rus)
51. Dukhovny G.S., Sachkova A.V. The effectiveness of the use of rubber-bitumen binder in the construction of asphalt concrete pavements [Effektivnost primeneniya rezinobitumnogo vyazhushchego pri ustroystve asfaltobetonnykh pokrytiy]. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. No. 2 (34). Pp. 19–23. (rus)
52. Karpenko A.V., Dukhovny G.S. Prerequisites and prospects for the use of rubber-bitumen binder [Predposylki i perspektivy primeneniya rezinobitumnogo vyazhushchego]. Innovative materials and technologies (XX scientific readings), Belgorod State University named after V.G. Shukhov. 2010. Pp. 267–269. (rus)
53. Karpenko A.V., Dukhovny G.S., Miroshnichenko S.I. Resinobitumennoe binder, main indicators and prospects of use [Rezinobitumnoye vyazhushcheye. osnovnyye pokazateli i perspektivy ispolzovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 1. Pp. 22–24. (rus)
54. Alekseenko V.V., Balabanov V.B. Asphalt concrete based on bitumen-rubber composite binders for road construction [Asfaltobeton na osnove bitumno-rezinovykh kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya dorozhnogo stroitelstva]. Bulletin of ISTU. 2011. No. 12 (59). Pp. 112–114. (rus)
55. Bespechnaya A. I. The main advantages of using rubber-bitumen asphalt concrete mixture for asphaltting and road repair [Osnovnyye preimushchestva ispolzovaniya rezinobitumnoy asfaltobetonnoy smesi pri asfaltirovanii i remonte dorog] [Electronic resource]. All about asphalt paving URL: <http://www.unidorstroy.kiev.ua/articles-asphalt-ing/rubb-erized-asphalt.html> (date accessed: 07.01.2020). (rus)
56. Verenko V.A., Afanasenko A.A. High-modulus asphalt concrete with increased binder content for road surfaces [Vysokomodulnyye asfaltobetonny s povyshennym soderzhaniyem vyazhushchego dlya dorozhnykh pokrytiy]. Bulletin of KhNADU. 2006. No. 34–35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/high-modular-asphalt-macadam-with-raised-content-of-binding-agent-for-road-carpet> (date of access: 10.01.2021). (rus)
57. Silkin V.V., Rudakova V.V., Lupanov A.P., Silkin A.V. Cast asphalt concrete. Preparation, transportation and laying of cast asphalt concrete [Lityy asfaltobeton. Prigotovleniye. transportirovaniye i ukladka litogo asfaltobetona]. CTT: construction equipment and technologies. 2015. No. 2 (110). Pp. 60–65. (rus)
58. Egorychev A.S., Kalgin Yu. I. Substantiation of the use of bituminous binder in cast asphalt-

concrete mixtures during the construction and repair of the roadway bridge pavement [Obosnovaniye primeneniya bitumnogo vyazhushchego v litykh asfaltobetonnykh smesyakh pri ustroystve i remonte pokrytiya proyeyzhey chasti avtodorozhnogo mosta]. Scientific journal of construction and architecture. 2018. No. 1 (49). Pp. 72–79. (rus)

59. Chebanov M.V. Prospects for the use of cast asphalt concrete [Perspektivy ispolzovaniya litogo asfaltobetona]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU im. V.G. Shukhov. 2017. Pp. 2332–2336. (rus)

60. Makarov V.N. Construction and technology of the construction of roadway bridges using cast asphalt concrete and modern expansion joints (for example, a bridge across the Volga near the village of Pristannoe, Saratov region) [Konstruktsiya i tekhnologiya ustroystva mostovogo polotna avtodorozhnykh mostov s primeneniym litogo asfaltobetona i sovremennykh deformatsionnykh shvov (na primere mosta cherez Volgu u sela Pristannoye Saratovskoy oblasti)]: dis ... candidate. tech. sciences. Volgograd, 2003. Pp. 54–55. (rus)

#### *Information about the authors*

**Vysotskaya, Marina A.** PhD, Assistant professor. E-mail: roruri@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kurlykina, Anastasia V.** Postgraduate student. E-mail: anastasiyakurlykina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Kuznetsov, Dmitry A.** PhD, Assistant professor. E-mail: xidox@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Tkacheva, Anna I.** Master student. E-mail: anya.tkacheva31@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 17.02.2021*

#### **Для цитирования:**

Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И. Одежда ездового полотна мостового сооружения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35

#### **For citation:**

Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V., Kuznetsov D.A., Tkacheva A.I. Road surface of the pavement coating bridge. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35

61. Pat. 2114953, Russian Federation, IPC E 01 S 7/18, S 04 B 26/26. A method for constructing a road and airfield pavement from a vibrated asphalt concrete mixture and a method for designing the composition of a vibrated asphalt concrete mixture [Sposob ustroystva dorozhnogo i aerodromnogo pokrytiya iz vibrolitoy asfaltobetonnoy smesi i sposob proyektirovaniya sostava vibrolitoy asfaltobetonnoy smesi]. M.S. Melik-Bagdasarov, N.A. Melik-Bagdasarova; applicant and patentee M.S. Melik-Bagdasarov, N.A. Melik-Bagdasarova. No. 96120624/03; declared 10.16.1996; publ. 10.07.1998. 2 p. (rus)

62. Onishchenko A.N., Kuzminets N.P., Prikhodovskiy V.S., Riznichenko A.S., Aksenov S.Yu. Substantiation of the construction of a pavement made of cast gusaspalt asphalt concrete of increased crack resistance and wheel resistance for the metal superstructure of the southern bridge over the river. Dnieper in Kiev. Naukovi notatki. 2014. No. 45. Pp. 396–406.

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-36-45

<sup>1</sup>Еремкин А.И., <sup>2</sup>\*Пономарева И.К., <sup>3</sup>Трофимов Д.А.<sup>1</sup>Пензенский государственный университет архитектуры и строительства<sup>2</sup>Пензенский государственный университет<sup>3</sup>Творческая мастерская Дмитрия Трофимова «Царьград»

\*E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНЫХ УСЛОВИЙ И СОХРАННОСТИ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ

**Аннотация.** Особенностью православных культовых сооружений является наличие в зале богослужения произведений зодчества, художественных росписей, икон, фресок, иконостасов, имеющих историко-культурную ценность. Спецификой культовых сооружений: церквей, храмов и соборов является так же круглогодичные богослужения и скопления большого количества прихожан и персонала, достигающих несколько тысяч человек. Известно, что в залах богослужения устанавливаются несколько десятков подсвечников с горящими свечами и в течении года сжигаются сотни килограмм свечей. Выделяющие вредности от людей – теплота, влага, углекислый газ и при сгорании свечей – копоть, сажа, влага, теплота, углекислый газ оседают на внутренних поверхностях зала богослужения на элементах оформления и убранства. В результате дорогостоящее оформление зала с годами темнеет от копоти, сажи и влаги, а другие вредности – теплота, влага, углекислый газ отрицательно сказываются на комфортных условиях и самочувствии прихожан и персонала. Для обеспечения сохранности историко-культурных ценностей и комфортных условий, предъявляются высокие требования к климатическим параметрам внутреннего воздуха в зале богослужения православных культовых сооружений: церквей, храмов и соборов.

**Ключевые слова:** местная вытяжная вентиляция, кондиционирование воздуха, копоть, сажа, влага, теплота, углекислый газ, вытяжной зонт, скорость воздуха, температура воздуха, свеча, конвективный поток, тепловизор, термоанемометр, элементы оформления, зал богослужения.

**Введение.** На основании проведенных исследований и анализе движения вентиляционных воздушных потоков и естественного перемещения воздуха внутри зала богослужения установлено, что выделяющие копоть и сажа, из-за неполного сгорания парафина от свечей, оседают на внутренние поверхности зала богослужения,

росписях, иконах, живописи и на одежде прихожан. В результате, оформление зала с годами приобретает закопченный неприглядный внешний вид. Другие выделяющиеся вредности: теплота, влага, углекислый газ, отрицательно сказываются на самочувствии прихожан и на оформление зала (рис.1).



Рис.1. Демонстрационный снимок горящих свечей на разных подсвечниках в зале богослужения Храма святых первоверховных апостолов Петра и Павла

**Материалы и методы.** Для подтверждения сделанных выводов проведены экспериментальные исследования выделения копоти и сажи при сжигании свечей. При этом использовался специально сконструированный в творческой мастерской Д.А. Трофимова «Царьград» стенд (рис. 2).

Внутри помещения установлена имитационная конструкция подсвечника с горящими и укрытием для улавливания копоти и сажи. Стены помещения обклеены белой бумагой. В течении одного месяца при сжигании более 4 тыс. свечей стены и потолок покрылись копотью и сажой. Аналогичные процессы происходят и в залах бо-

гослужения при сгорании свечей, что отрицательно сказывается на убранствах и оформлении

помещений православных церквей, соборов и храмов.

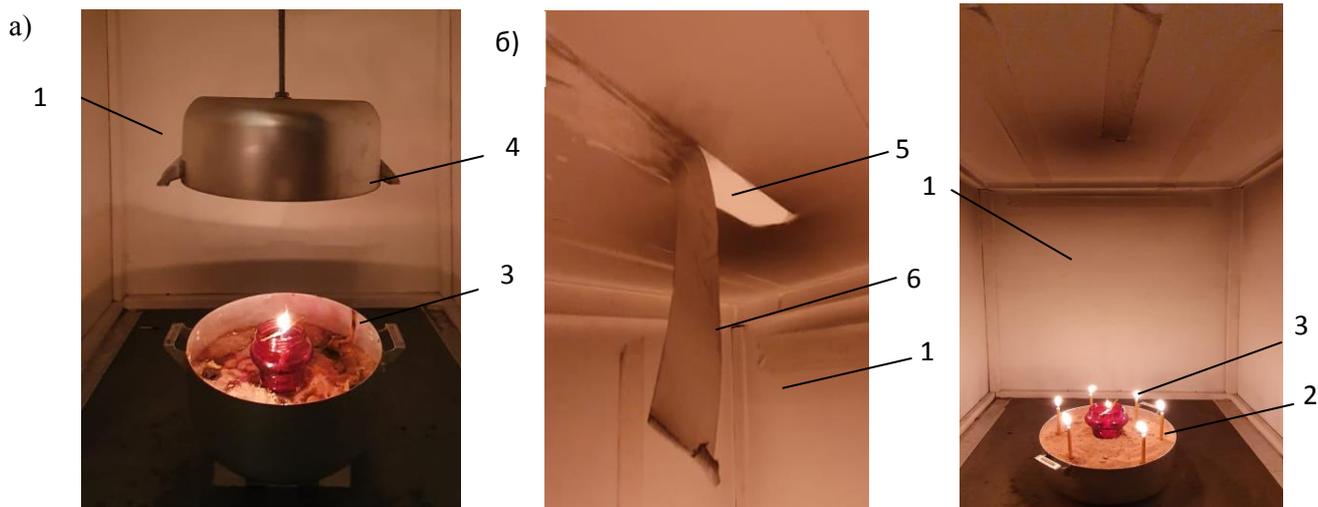


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования процесса выделения копоти и сажи на поверхностях стен и оформлении помещения: 1 – помещение; 2 – подсвечники; 3 – свеча; 4 – укрытие для улавливания копоти и сажи; 5 – наклейка белой бумаги на поверхности потолка до горящих свечей; 6 – сажа и копоть; а – схема укрытия над подсвечником для улавливания копоти и сажи; б – снятие части закопченной бумаги с поверхности потолка; в – состояние поверхности помещения вначале горения свечей

Регулярный ремонт, восстановительные и реставрационные работы требуют значительных затрат. Для борьбы с указанными вредностями в большинстве православных церквей, соборов и храмов применяют энергоемкие системы вентиляции и кондиционирования воздуха в целях экономии в сочетании с естественной вентиляцией [1, 3, 4].

Имеются примеры для улавливания выделяющихся вредностей при сгорании свечей в Храме

Рождества Пресвятой Богородицы г. Самара (рис. 3, а), смонтированное над подсвечниками укрытие в Храме Живоначальной Троицы г. Астрахань (рис. 3, б), не соответствует конструктивным требованиям и не обеспечивает должное улавливание, а главное – не обеспечивает удаление копоти и сажи из зала богослужения. Имеются и другие примеры укрытий, не имеющие теоретического и экспериментального обоснования.

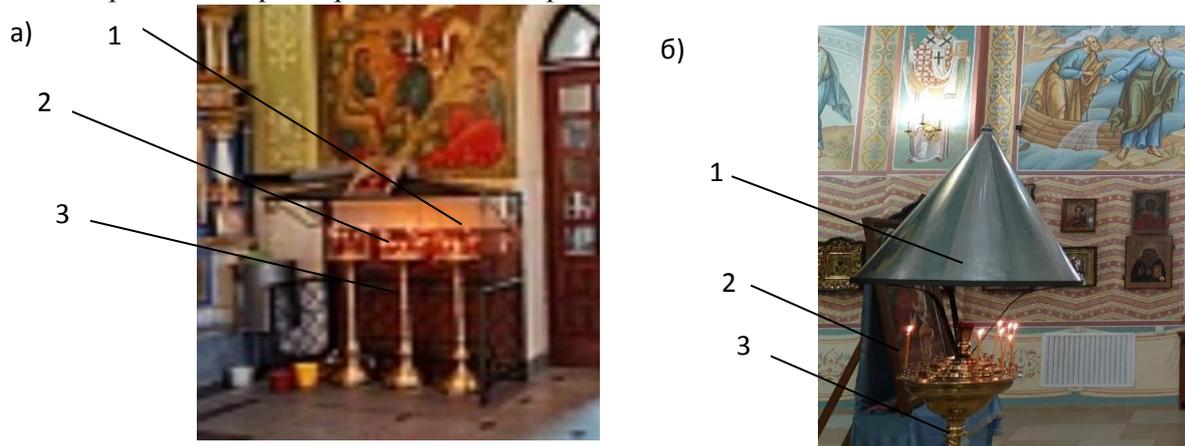


Рис. 3. Укрытие на подсвечником: а) в Храме Рождества Пресвятой Богородицы г. Самара; б) в Храме Живоначальной Троицы г. Астрахань; 1 – укрытие; 2 – свеча; 3 – подсвечник.

Несмотря на существенные затраты на использование систем вентиляции и кондиционирования воздуха, проблема создания внутреннего микроклимата в зале богослужения православных церквей, храмов и соборов остается неудоб-

влетворенной и актуальной и требует новых подходов с целью улавливания и удаления вредностей при сжигании свечей [2, 5].

**Основная часть.** Авторами предлагается инновационная система по типу местной вытяжной механической вентиляции для улавливания,

а затем удаления вредных веществ непосредственно в местах их образования при сжигании свечей в зале богослужения православных культовых сооружений. При этом предлагается применять для улавливания и удаления вредных веществ традиционные и разработанные авторами вытяжные зонты (рис. 4). Для эффективной работы системы местной вытяжной вентиляции необходимо предусмотреть ряд технических и конструктивных требований: обеспечение условий безопасности; источник образования вредных веществ должен эффективно укрыт; вытяжной зонт над подсвечником устанавливается на расчетной высоте.; вытяжной зонт не должен мешать движению прихожан; оси направления движения воздуха в зонте

и конвективном потоке должны совпадать; зонты и воздуховоды должны иметь эстетически-привлекательный внешний вид; система местной вытяжной механической вентиляции должна иметь малое гидравлическое сопротивление; форма входного отверстия вытяжного зонта должна совпадать с формой столешницы подсвечника; размер входного отверстия зонта должны быть больше столешницы подсвечника и определяется расчетом. Для технического решения местной механической вытяжной вентиляции предлагаются известные (рис. 3, а, б, в) и предложенные авторами конструкции зонтов (рис. 4, г, д).

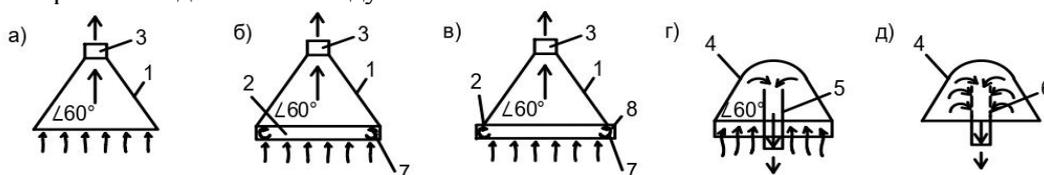


Рис. 4. Типы вытяжных зонтов над столешницей светильников для улавливания и удаления продуктов сгорания свечей: а – простой зонт; б – зонт с навесом; в – зонт с карманом; г – зонт с опрокинутым удалением воздуха; д – эффективный зонт с опрокинутым удалением воздуха; 1 – конусная часть; 2 – юбка; 3 – вытяжной воздуховод; 4 – конусная часть с закруглением вершины зонта; 5 – вытяжная труба; 6 – перфорированная под зонтом вытяжная труба

Анализ работы вытяжного зонта в натуральных условиях показал, что его конфигурация, размеры и высота установки над подсвечником зависят от целого ряда факторов: тепловой мощности конвективного потока при сгорании свечей; объема воздуха в конвективном потоке; скорости движения и температуры воздуха в зоне вытяжных зонтов в конвективном потоке; нали-

чие внешнего движения воздуха в зале богослужения. Определение значений температуры и скорости воздуха в конвективном потоке, необходимых для определения места расположения и расстояния между пламенем от свечи до нижней кромки зонта с целью разработки местной вытяжной механической вентиляции, создана экспериментальная установка, показанная на рис.5.

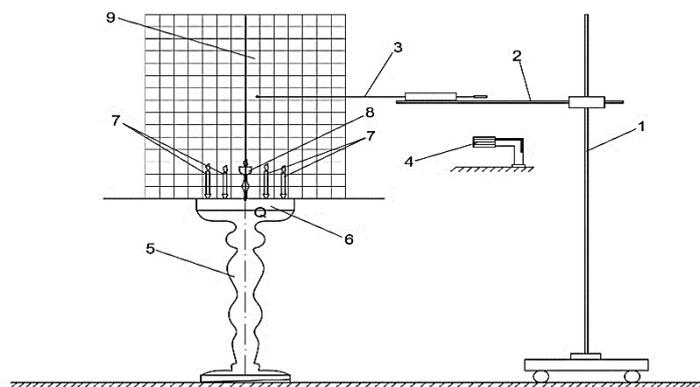


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования плоских температурных и скоростных полей конвективного потока при сгорании свечей: 1 – координатник; 2 – держатель координатника; 3 – датчик термоанемометра; 4 – тепловизор; 5 – стойка подсвечника; 6 – столешница подсвечника; 7 – свечи; 8 – лампада; 9 – условная координатная сетка

Экспериментальные измерения параметров конвективного температурного потока  $t$ , °С, скорости воздуха  $V$ , м/с, расход воздуха  $L$  м<sup>3</sup>/ч, образующегося при сгорании свечей, проводились

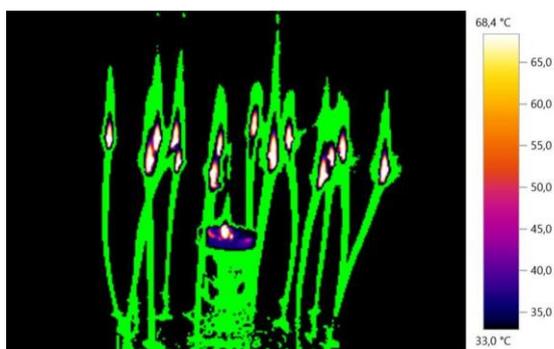
согласно ГОСТ 12.3.018-79 Для измерения температуры и скорости воздуха в конвективном потоке и на периферии применялся термоанемометр типа ТКА-ПКМ(60) прибор комбинированный. Для определения границы конвективного

потока, температуры внутри и на оси потока применялся тепловизор инфракрасный Testo-882-4. Тепловизионный контроль проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 26629-85. Метод тепловизионного измерения основан на дистанционном измерении температуры, используемые измерительные приборы прошли государственную поверку. Экспериментальное исследование проводилось в зале богослужения Храма святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе.

При исследовании конвективного потока скорость и температура воздуха измерялись в поперечном сечении через 10 см и по высоте на расстояниях: 0 см; 10 см; 20 см; 30 см; 40 см; 50 см; 60 см; 70 см; 80 см; 90 см; 100 см; 110 см; 120 см от начала координат, расположенного на уровне столешницы подсвечника.

Оценка погрешности измерений скорости и температуры воздуха в конвективном потоке

а)



производилась с применением известных методов обработки результатов измерений [6–9]. Расчеты погрешности измерения скорости воздуха составили  $\pm 12,8\%$ , а температура воздуха в конвективном потоке  $14,1\%$  при доверительном интервале вероятности 0,95, что является допустимой погрешностью при проведении подобных экспериментов.

В литературе достаточно подробно исследованы конвективные воздушные потоки от равномерно нагретых вертикальных и горизонтальных поверхностей различной формы. При этом воздушный конвективный поток имеет однородную целостную компактную форму и однотипную структуру. В ходе экспериментальных исследований установлено, что конвективный воздушный поток от открытого пламени при сгорании свечей, размещенных на столешнице подсвечника, значительно отличается от традиционных. (рис. б).

б)



Рис. 6. Тепловизионный снимок воздушного цилиндрического конвективного потока от горящих свечей: а – форма и температура воздуха в конвективном потоке; б – подсвечник с горящими свечами

Анализ данных, приведенных на рис. 6, позволяет сделать вывод, что все свечи, установленные по периметру в несколько рядов на расстоянии друг от друга 3–5 см образует свой индивидуальный конвективный воздушный поток в виде тепловой струи (рис. 6, а). Общий конвективный поток воздуха состоит из множества индивидуальных конвективных струй, которые на всем протяжении не сливаются в единый поток (рис. 6, а). Температура воздуха на внешне стороне конвективного потока цилиндрической формы изменялась от  $33\text{ °C}$  в верхней части потока в зоне расширения струи до  $68,4\text{ °C}$  в зоне пламени свечей. Значение температуры воздуха необходимо учитывать при выборе расстояния между верхом пламени свечи и нижней кромкой вытяжного зонта. При высокой температуре потока воздуха эффективней происходит улавливание и удаление выделяющихся при горении свечи вредных веществ, в данном случае может составлять 50–60 см.

На оси цилиндрического конвективного потока, где отсутствуют свечи, температура воздуха значительно ниже, чем на периферийной области с горящими свечами и изменяется от  $25,3$  до  $33,2\text{ °C}$ . Данная особенность объясняется тем, что свечи размещаются на подсвечнике по внешнему периметру в несколько рядов. В центре столешницы подсвечника имеется свободная площадь без свечей, кроме одной лампы с горящим фитилем. Тогда общий конвективный поток имеет цилиндрическую форму без теплового потока внутри и множеством отдельных конвективных струй от каждой свечи по периметру.

На практике применяются подсвечники с размещением свечей по всей площади столешницы подсвечника (рис. 7, б). При таком размещении свечей конвективный поток так же состоит из отдельных конвективных струй от каждой отдельной свечи по всей площади столешницы подсвечника (рис. 7, а).

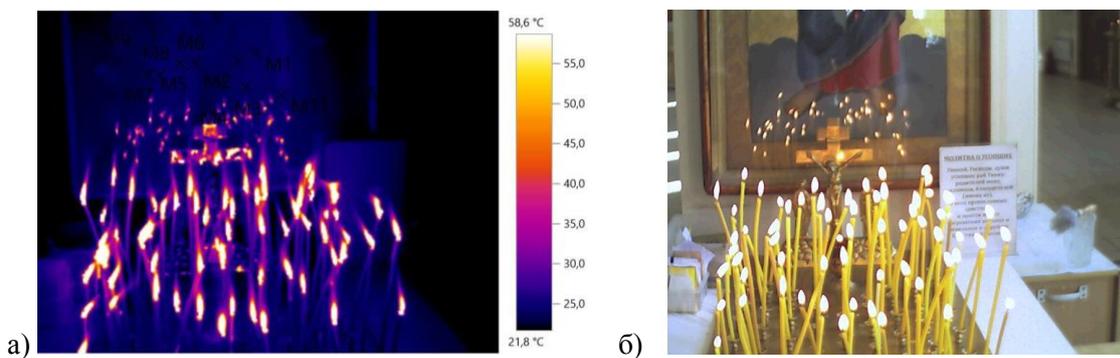


Рис. 7. Тепловизионный снимок сплошного воздушного конвективного потока от горящих свечей: а – форма и температура воздуха в конвективном потоке; б – подсвечник с горящими свечами

Установлено, что температура воздуха на оси конвективного потока изменяется от 58,6 °C в зоне горения свечей до 21,8 °C в верхней части потока в зоне расширения (рис. 7, а). Учитывая значения температуры воздуха в конвективном потоке и удобства при постановке свечей прихожанами, расстояние от верха горения свечи до низа кромки вытяжного зонта рекомендуется применить 50–60 см. Выявленные особенности конвективного потока при сгорании свечей недостаточны для расчета параметров и расхода воздуха в потоке и определения конструктивных и установочных размеров вытяжного зонта в системе местной вытяжной механической вентиляции. Дальнейшие исследования проводились в натуральных условиях в зале богослужения Храма святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе. На экспериментальном стенде (рис. 5) с помощью термоанемометра измерялись значения температуры воздуха в конвективном потоке над отдельно горящей свечей, расположенной на столешнице подсвечника. Полученные экспериментальные данные приведены в виде графика на рис. 8.

Анализ графика изменения температуры воздуха  $t$  °C по вертикале  $h$ , см в конвективном потоке позволяет сделать вывод, что по высоте свечи от 0 до 20 см температура изменяется незначительно от 28 до 28,9 °C и практически соответствует температуре окружающей среды. Резкое возрастание температуры воздуха в потоке наблюдается над горящей свечей до 50,1 °C и постепенно уменьшается по высоте на уровне 60 см до 39,2 °C и на высоте 100 см температура воздуха в потоке соответствует температуре окружающей среды в помещении зала.

На высоте до 60 см конвективный поток сохраняет стабильность за счет наличия высокой температуры, это позволяет максимально улавливать вредности с помощью вытяжного зонта, установленного над подсвечником на высоте 60 см от пламени свечи до нижней кромки зонта

и максимально улавливает и удаляет копоть, сажу и другие вредности наружу.

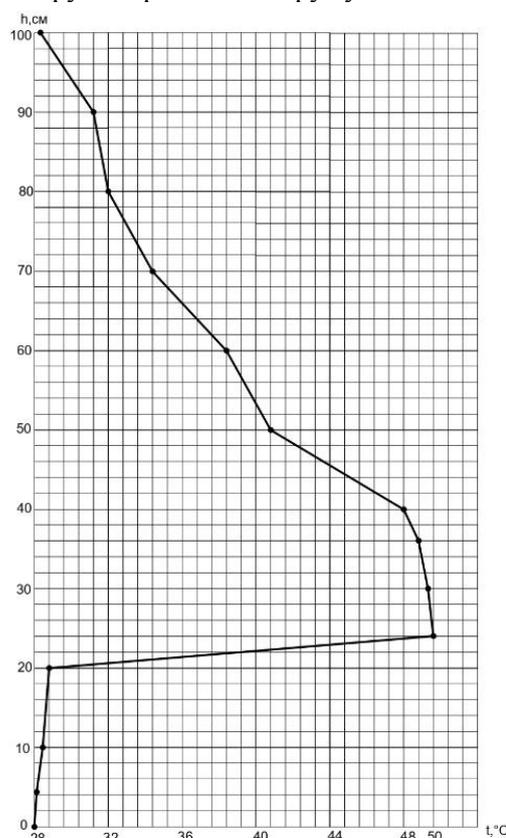


Рис. 8. График изменения температуры воздуха  $t$  °C по высоте  $h$ , см конвективного потока над отдельно горящей свечей на подсвечнике.

С целью достижения высокой эффективности работы вытяжного зонта и подтверждения высоты установки над подсвечниками, проведены дополнительные исследования изменения скорости конвективного потока  $V$ , м/с в зоне измерения температуры воздуха. Полученные результаты исследований скорости воздуха  $V$ , м/с производились с помощью термоанемометра и приведены на рис. 9.

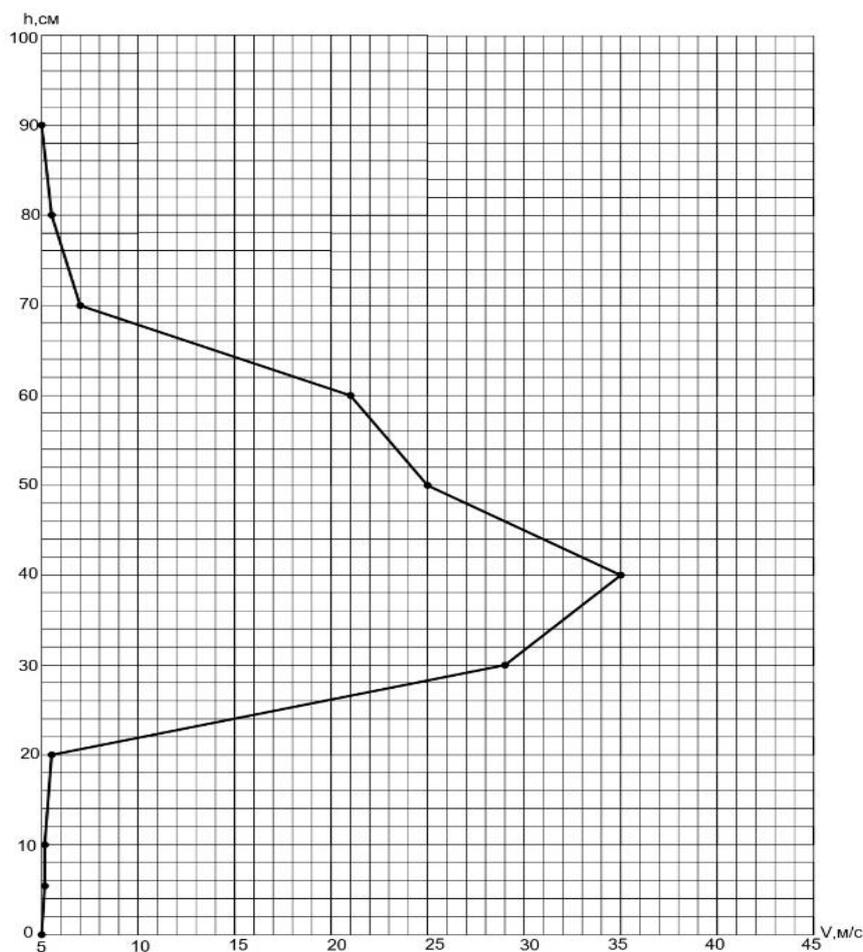


Рис. 9. График изменения скорости воздуха  $V$ , м/с по высоте  $h$ , см конвективного потока над отдельно горящей свечей на подсвечнике

Из анализа полученных данных следует, что:

- Скорость воздуха возле свечи на высоте от 0 до 20 см изменяется незначительно от 0,6 до 0,7 м/с, что соответствует подвижности воздуха в окружающей среде возле подсвечника. Резкое возрастание скорости наблюдается в струе над пламенем свечи на высоте 30 см и соответствует 28 м/с и достигает максимума в струе 36 м/с на отметке 40 см. Далее, по мере удаления от горячей свечи, скорость воздуха в струе снижается до 23,8 м/с на расстоянии 50 см и 19,4 м/с на высоте 60 см и 6,6 м/с на отметке 70 см.

- На отметке 90 см скорость воздуха в струе соответствует 0,2 м/с, что и в помещении зала. Полученные данные подтверждают установку вытяжного зонта на высоте до 60 см от пламени свечи до нижней кромки вытяжного зонта в зоне стабильного конвективного потока. На основе проведенных исследований авторами предлагается следующая модель структуры конвективного воздушного потока в следствии выделения теплоты от открытого горения свечей на под-

свечнике рис.9. При этом использовались выявленные в статье значения температуры и подвижности воздуха в конвективном потоке, полученные с использованием тепловизора и термоанемометра. При формировании модели использовались теоретические методы автора Шепелева И.А. [4].

- Общий конвективный поток состоит из отдельных индивидуальных конвективных струй воздуха, образующихся от каждой отдельной горячей свечи, которые на участке IV не соединяются между собой, а затухая смешиваются с окружающей средой (рис. 5, 9). Пространство между свечами и нижней кромкой зонта захватывает участки I, II, и III на расстоянии от 50 до 60 см и обеспечивает свободное подтекание прилегающего воздуха. Это способствует с помощью вытяжных зонтов полному удалению продуктов сгорания от свечей: теплоты, влаги, копоти, пара, сажи и углекислого газа. Предлагаемые вытяжные зонты входят в систему местной механической вытяжной вентиляции (рис.11).

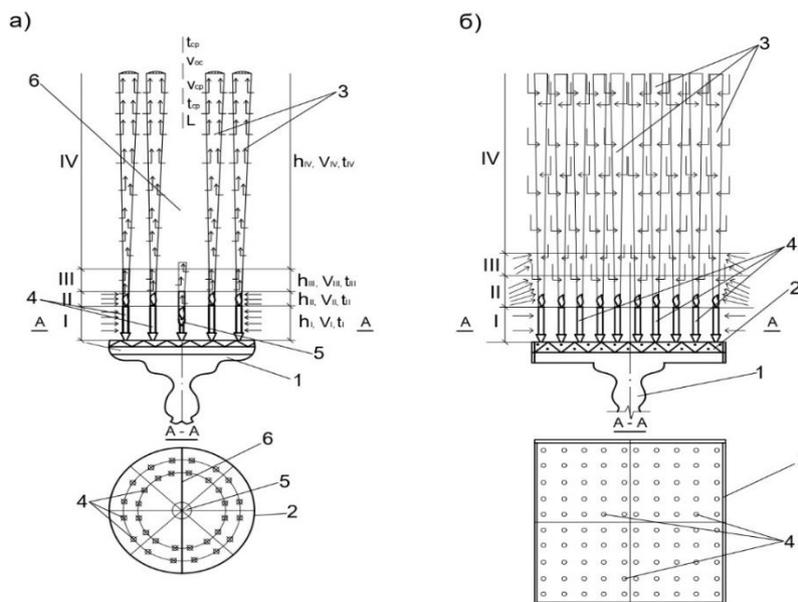


Рис.10. Схема структуры суммарной конвективной струи над пламенем горящих свечей над столешницей под-свечника: а – цилиндрической формы; б – прямоугольной формы. I – пассивный участок подтекания прилегающего воздуха; II - активный участок подтекания прилегающего воздуха; III – участок разгона; IV – участок расширения каждой свечи за счет подтекания прилегающего воздуха;  $h_I, h_{II}, h_{III}, h_{IV}$  – высота соответствующей зоны, см;  $V_I, V_{II}, V_{III}, V_{IV}$  – скорости воздуха в соответствующем участке, м/с;  $t_I, t_{II}, t_{III}, t_{IV}$  – температура воздуха в соответствующем участке, °С;  $t_{oc}, V_{oc}$  – соответственно температура и скорость на оси суммарной конвективной струи;  $t_{cp}, V_{cp}$  – соответственно средняя температура и скорость на оси суммарной конвективной струи;  $L$  – расход воздуха в суммарной конвективной струе м<sup>3</sup>/ч; 1 – подсвечник; 2 – столешница; 3- конвективный поток от отдельной свечи; 4 – свеча; 5 – лампада; 6 – полая часть цилиндрического конвективного потока

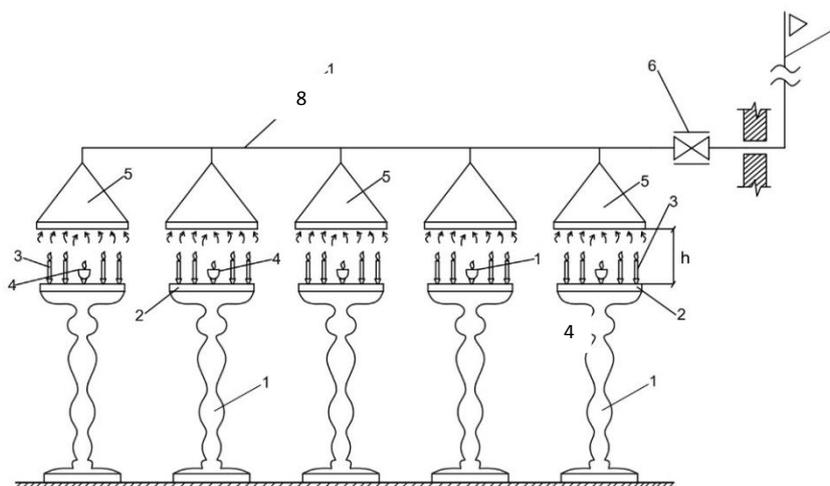


Рис.11. Предлагаемая схема инновационной местной механической вытяжной системы вентиляции: 1 – подсвечник; 2 – столешня; 3 – свеча; 4 – лампада; 5 – вытяжной зонт; 6 – вентилятор; 7 – удаление загрязненного воздуха; 8 – система воздуховодов; h – расстояние от столешни до нижней кромки зонта

В указанной системе вентиляции все подсвечники рекомендуется устанавливать в одну линию вдоль наружной стены зала богослужения или в отдельном помещении на расстоянии удобном и безопасном для прихожан. Выделяющиеся вредности при сгорании свечей и лампы из зонтов поступают в вытяжную систему воздуховода и далее с использованием вентилятора удаляются в атмосферу через воздуховод для удаления загрязненного воздуха.

**Выводы.** Выполненные в данной статье теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Особенностью православных церквей, храмов и соборов является наличие в зале богослужения произведений зодчества, художественных росписей, икон, фресок, золочения, иконостасов, имеющих историко-культурную ценность.

2. Проведен анализ выделяющихся вредностей от людей и при сгорании свечей на подсвечниках – теплота, влага, углекислый газ, которые перемещаются в объеме зала богослужения и часть которых оседает на элементах оформления и убранства, причиняя значительный ущерб внешнему виду.

3. В отечественной и зарубежной практике, а также в нормативной документации до сих пор отсутствуют рекомендации по применению местной вытяжной вентиляции для улавливания и удаления вредностей при сгорании свечей на подсвечниках в залах богослужения православных церквей, храмов и соборов.

4. Для решения проблем сохранности историко-культурного наследия впервые разработана применительно к залу богослужения православных церквей, храмов и соборов система местной вытяжной вентиляции для улавливания и удаления вредностей при сгорании свечей в местах их образования. Для этого предлагается использовать конструкции, существующих и разработанных авторами вытяжных зонтов и систему удаления вредностей из зала богослужения в атмосферу.

5. Авторами проведены экспериментальные исследования конвективных потоков за счет теплоты сгорания свечей, в результате которых были установлены границы изменения температуры и скорости воздуха в потоке, выявлена область стабильного состояния потока, что позволило определить высоту установки зонта над столешней подсвечника, равной 60 см.

6. Используя теоретические основы и закономерности процессов конвективных потоков от нагретых поверхностей, впервые разработана модель конвективного потока от открытого пламени группы отдельно горящих свечей, состоящая из четырех участков. Выявлены особенности на участках конвективного потока, необходимые для определения размера и объема вытяжного зонта, место его установки, расстояние от места горения свечей до нижней кромки зонта.

7. Проведенные исследования и полученные результаты позволяют разработать методику создания, применительно к церквям, храмам, соборам, инновационной местной вытяжной системы вентиляции, размеры и место установки вытяжного зонта для улавливания и удаления вредностей, образующихся при сгорании свечей на подсвечниках и обеспечения сохранности исторических и художественных ценностей в зале богослужения, а также создания комфортных условий для прихожан и персонала православных культовых сооружений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриева Л.С., Кузьмина Л.В., Мошкарнев Л.М. Планирование эксперимента в вентиляции и кондиционировании воздуха. Иркутск: Иркутский университет, 1987. 210 с.
2. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 210 с.
3. Успенская Г.В. Математическая статистика в вентиляционной технике. М.: Стройиздат, 1980. 108 с.
4. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 178 с.
5. Кочев А.Г. Микроклимат православных храмов: монография. ННГАСУ. 2004. 449 с.
6. Благовест. Чем дышать храмы? [Электронный ресурс]. URL: <https://blagovest.ru/blog/chem-dyshat-khramy/> (дата обращения 02.12.2020).
7. Еремкин А.И., Пономарева И.К., Багдасарян А.Г. Анализ и способы обеспечения микроклимата в православных соборах и храмах // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 4. С. 151–158.
8. Еремкин А.И., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 4. С. 125–136.
9. Еремкин А.И., Пономарева И.К., Багдасарян А.Г. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 6. С. 151–155.
10. Кочев А.Г. Системы кондиционирования микроклимата в православных храмах. М.: АВОК - Пресс, 2009. 230 с.
11. Коновалов, В. Техническая термодинамика. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. 2005. 620 с.
12. Орлов М.Е. Теоретические основы тепло-техники. Тепломассообмен. Ульяновск: УлГТУ. 2013. 204 с.
13. Бухмиров В.В. Нестационарная теплопроводность. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина 2013. 360 с.
14. Мирам А.О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен. М.: АСВ. 2011. 352 с.
15. Кудинов А.А. Тепломассообмен: учебник для вузов. М.: ИНФРА-М. 2012. 374 с.

*Информация об авторах*

**Еремкин Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: eremkin@pguas.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г.Титова, д. 28.

**Пономарева Инна Константиновна**, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры Бухгалтерский учет, налоги и аудит. E-mail: inna.ok007@rambler.ru. Пензенский государственный университет. Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д. 40.

**Трофимов Дмитрий Александрович**, член московского Союза художников, руководитель творческой мастерской «Царьград». E-mail: td7497048@gmail.com. Творческая мастерская Дмитрия Трофимова «Царьград». Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 65А.

Поступила 16.12.2020 г.

© Еремкин А.И., Пономарева И.К., Трофимов Д.А., 2021

<sup>1</sup>Eremkin A.I., <sup>2,\*</sup>Ponomareva I.K., <sup>3</sup>Trofimov D.A.

<sup>1</sup>Penza State University of Architecture and Construction

<sup>2</sup>Penza State University

<sup>3</sup>Creative workshop of Dmitry Trofimov "Tsargrad"

\* E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## IMPROVEMENT OF CLIMATE SUPPLY SYSTEMS OF COMFORT AND PRESERVATION OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE IN ORTHODOX CULTURAL FACILITIES

**Abstract.** A special feature of Orthodox religious buildings is the presence in the worship hall of works of architecture, artistic murals, icons, frescoes, iconostases of historical and cultural value. The specificity of religious buildings: churches, temples and cathedrals is also year-round services and gatherings of a large number of parishioners and staff, reaching several thousand people. It is known that several dozen candlesticks with burning candles are installed in the halls of worship, and hundreds of kilograms of candles are burned throughout the year. Heat, moisture, and carbon dioxide, which emit harmful substances from people, and when candles are burned - soot, smoke, moisture, heat, carbon dioxide settle on the inner surfaces of the worship hall on the elements of design and decoration. As a result, the expensive decoration of the hall darkens over the years from smoke, moisture and other hazards - heat, moisture, carbon dioxide negatively affect the comfort conditions and well-being of parishioners and staff. To ensure the preservation of historical and cultural values and comfortable conditions, high requirements are imposed on the climatic parameters of the internal Orthodox religious buildings in the worship hall: churches, temples and cathedrals.

**Keywords:** local exhaust ventilation, air conditioning, soot, soot, moisture, heat, carbon dioxide, exhaust hood, air speed, air temperature, candle, convective flow, thermal imager, hot-wire anemometer, design elements, worship hall.

### REFERENCES

1. Dmitrieva L.S., Kuzmina L.V., Moshkarnev L.M. Planning an experiment in ventilation and air conditioning. [Planiruyem eksperiment po ventilyatsii i konditsionirovaniyu]. Irkutsk.: Irkutsk University, 1987. 210 p. (rus)

2. Kassandrova ON, Lebedev VV. Processing of observation results. [Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya]. Moscow: Nauka, 1970. 210 p. (rus)

3. Uspenskaya G.V. Mathematical statistics in ventilation technology. [Matematicheskaya statistika v ventilyatsionnoy tekhnike]. M.: Stroyizdat, 1980. 108 p. (rus)

4. Shepelev I.A. Indoor air flow aerodynamics. [Aerodinamika vozdušnogo potoka v pomeshchenii]. M.: Stroyizdat, 1978. 178 p. (rus)

5. Kochev A.G. Microclimate of Orthodox churches. [Mikroklimat pravoslavnykh khramov]. NNGASU. 2004. 449 p. (rus)

6. Annunciation. How can temples breathe? [Kak khramy mogut dyshat']. [Electronic resource]. URL: <https://blagovest.ru/blog/chem-dyshat-khramy>. (date of treatment 12/02/2020). (rus)

7. Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Bagdasaryan A.G. Analysis and methods of providing a microclimate in Orthodox cathedrals and temples. [Analiz i metody obespecheniya mikroklimata v pravoslavnykh soborakh i khramakh]. Education and Science in the Modern World. Innovation. 2020. No. 4. Pp. 151–158. (rus)

8. Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Petrova K.A., Bagdasaryan A.G. Ways to improve the quality of the microclimate in the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza. [Sposoby uluchsheniya

kachestva mikroklimata v molel'nom zale Spasskogo sobora v Penze]. Regional architecture and construction. 2020. No. 4. Pp. 125–136. (rus)

9. Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Bagdasaryan A.G. The influence of the sanitary and hygienic state of the microclimate in the halls of worship of Orthodox cathedrals on the physiological state of parishioners. [Vliyaniye sanitarno-gigiyenicheskogo sostoyaniya mikroklimata v molel'nykh zalakh pravoslavnykh soborov na fiziologicheskoye sostoyaniye prikhozhan]. Education and Science in the Modern World. Innovation. 2020. No. 6. Pp. 151–155. (rus)

10. Kochev A.G. Microclimate conditioning systems in Orthodox churches. [Sistemy konditsionirovaniya mikroklimata v pravoslavnykh khramak]. M.: AVOK – Press. 2009. 230 p. (rus)

11. Konovalov, V.I. Technical thermodynamics [Tekhnicheskaya termodinamika]. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. 2005. 620 p. (rus)

12. Orlov M.E. Theoretical foundations of heat engineering. Heat and mass transfer [Teoreticheskiye osnovy teplotekhniki. Teplomassoobmen]. Ulyanovsk: UIGTU. 2013. 204 p. (rus)

13. Bukhmirov V.V. Non-stationary thermal conductivity [Nestatsionarnaya teploprovodnost]. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. 2013. 360 p.

14. Miram A.O. Technical thermodynamics. Heat and mass transfer [Tekhnicheskaya termodinamika]. M.: ASV. 2011. 352 p. (rus)

15. Kudinov A.A. Heat and mass transfer [Teplomassoobmen]. M.: INFRA-M. 2012. 374 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Eremkin, Alexander I.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: eremkin@pguas.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

**Ponomareva, Inna K.** Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Accounting, Taxes and Audit. E-mail: inna.ok007@rambler.ru. Penza State University. Russia, 440026, Penza, Krasnaya st., 30.

**Trofimov, Dmitry A.** member of the Moscow Union of Artists, head of the creative workshop "Tsargrad". E-mail: td7497048@gmail.com. Creative workshop of Dmitry Trofimov "Tsargrad". Russia, Moscow, st. Vavilova, 65A.

---

*Received 16.12.2020*

#### **Для цитирования:**

Еремкин А.И., Пономарева И.К., Трофимов Д.А. Совершенствование систем климатического обеспечения комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 36–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-36-45

#### **For citation:**

Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Trofimov D.A. Improvement of climate supply systems of comfort and preservation of historical and cultural heritage in orthodox cultural facilities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 36–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-36-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-46-52

**\*Хербез В.**

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет

\*E-mail: v.herbez@yahoo.com

**О ФОРМИРОВАНИИ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ  
В УСЛОВИЯХ ИСТОРИКО-ПРИРОДНЫХ ЗАПОВЕДНИКОВ  
(НА ПРИМЕРЕ СКАДАРСКОГО ОЗЕРА В ЧЕРНОГОРИИ)**

**Аннотация.** Скадарское озеро, расположенное в Черногории, представляет собой уникальный природный ресурс, объединяющий благоприятный климат, хорошее географическое положение, разнообразную флору и фауну, а также многочисленные культурно-исторические памятники находящиеся по всему бассейну. Этот ценный природный ресурс является новой и пока неразвитой туристической нишей в Черногории, требующей особого подхода с учетом уже созданной социально-культурной среды, а также принципов устойчивого развития. Одним из выдающихся способов организации и структурирования, применяющихся в туризме, является кластерный подход. Следовательно, рассмотрена возможность создания туристско-рекреационных кластеров на территории заповедника Скадарское озеро в Черногории, как новой многокомпонентной структуры, интегрированной в национальные и местные рамки стратегического планирования, увеличивающей жизнеспособность туристической деятельности и оказывающей синергетический эффект на туризм и сферы сопутствующих услуг.

Проведен анализ, позволяющий определить основные составляющие туристско-рекреационных кластеров необходимые для перехода от развития единичных территорий с туристским потенциалом к устойчивому развитию территории Скадарского озера, создавая синергетический эффект. Анализ подтвердил необходимость стратегического и системного подхода в устойчивом развитии Скадарского озера и использования его потенциалов, а также актуальность кластерного подхода в развитии сферы отдыха и путешествий. Также, проведенное авторами исследование подтвердило, что Скадарское озеро следует рассматривать как единое целое и, что туристско-рекреационные кластеры представляют наиболее эффективные и гибкие структуры, приносящие пользу как природе, так и посетителю.

**Ключевые слова:** кластеры, туристическое ядро, устойчивость, заповедники, синергия.

**Введение.** Скадарское озеро, две третьих которого принадлежат Черногории и одна треть Албании, является самым большим озером на Балканском полуострове. Один из пяти заповедников в Черногории, Скадарское озеро, территория которого принадлежит трем муниципалитетам, находится в 20 км от столицы Черногории, г. Подгорица. В туристической деятельности на территории Скадарского озера встречаются многочисленные проблемы, такие как: неразвитая индустрия туризма, миграции местного населения, уменьшение туристических потоков, обостряющаяся конкуренция со стороны других туристских районов и т. д. Главным препятствием в развитии туризма на территории Скадарского озера является отсутствие уникального туристического продукта, что снижает ценность и ограничивает видимость местных продуктов, а также отсутствие сети предложения туристического контента малых предпринимателей и координации между поставщиками продуктов и услуг в регионе.

**Объект и задачи исследования.** Актуальность темы обосновывается необходимостью применения кластерного подхода в организации

уникальных туристско-рекреационных кластеров на территории Скадарского озера. Задачами исследования является анализ основных составляющих туристско-рекреационных кластеров, а также определение факторов их успешного формирования и функционирования. Объектом исследования являются туристско-рекреационные кластеры в мировой практике. Цель исследования состоит в выявлении ключевых проблем в организации туризма на Скадарском озере, а также в определении основных составляющих туристско-рекреационных кластеров и разработки модели развития кластеров на территории Скадарского озера.

**Материалы и методы.** Проанализированы научные труды на тему туристско-рекреационных кластеров, а также обозначена степень изученности проблемы размещения организации кластеров на территории Скадарского озера. Метод исследования включает анализ и обобщение международного опыта проектирования и строительства туристических кластеров, а также систематизации научных разработок, представленных как в отечественной, так и зарубежной литературе. Новизна статьи состоит в изучении применения системы кластеров для будущего развития

Скадарского озера. Данная тема является хорошо изученной областью. Вопросы кластерного подхода, как новой системы управления ресурсами, объединяющие существующий потенциал среды, научно-технологический прогресс и государственно-частные партнерства, в настоящее время являются весьма актуальными и рассматриваются в работах ряда авторов, как отечественных, так и зарубежных, например, Рудченко В.Н., Балакиной А.Е., Колядина А.П., Ковалева И.В., Ульянова М.Н., Коробенко Я.В. и т.д. В Черногории подобные научные разработки велись Марич И.

Глобальные тенденции, влияющие на развитие туристического рынка и формирующие туристов нового поколения, желающих испытать новые, особые туристические впечатления, определяют направление развития туристического предложения. Кластер как новая форма предпринимательской структуры, приносящая значительную часть доходов в государственную казну, ориентирована на развитие всего региона [1]. Региональные кластеры направлены на создание положительного эффекта не только для самого кластерного объединения и его участников, но и для регионов базирования за счет увеличения занятости населения, роста заработной платы и как следствие повышение благосостояния населения, стимулирования предпринимательской активности, ускорения регионального научно-технического прогресса, совершенствования и развития региональной инновационной системы и пр. [2]. Развитие кластерных структур является приоритетом и важной предпосылкой для эффективного стратегического партнерства логистических и географически связанных субъектов экономической системы [3]. Кластерный эффект наиболее ярко проявляется в туристической отрасли, так как туристическая отрасль включает в себя не только предприятия туризма, но и предприятия смежных с туризмом отраслей [4, 5]. Кластерный подход считается подходящей стратегией в развивающиеся экономики и менее развитых регионах [6]. Туристско-рекреационные кластеры представляют собой комплексы взаимосвязанных объектов туристской индустрии, снабжённых необходимой инфраструктурой [7]. Туристические ресурсы определяют особенность кластера и представляют собой составляющие его элементы. Уникальность туристических ресурсов и местные традиции влияют на выбор специфики туристического кластера [8]. Потребителями услуг туристско-рекреационного кластера выступают туристы – люди, посещающие выделенную территорию с целью восстановления физических, психических, интеллектуальных и духовных сил через использование как природных,

так и природно-антропогенных факторов [9]. Туристы ищут уникальные места, которые они могли бы идентифицировать или связать со своей идентичностью более глубоким образом [10]. Общая тенденция формирования круглогодичных туристско-рекреационных кластеров [11] вырастает из потребностей и возможностей, вызванных новыми экологическими и экономическими ограничениями [12]. Главным препятствием в данном процессе является отсутствие экспериментальных разработок, являющиеся причиной нерационального природопользования, проблем сложившейся системы расселения, задержки в экономическом развитии малого и среднего бизнеса [13], а также отсутствие взаимодействия между малыми экономическими субъектами [14]. В условиях быстроразвивающейся туристической индустрии ключевым этапом является вложение больших усилий в создание новых туристических продуктов и услуг, а также в поиск способов укрепления позиции на рынке туристических услуг [14]. Создание конкурентоспособного туристского продукта – одна из важных задач, стоящих перед туристско-рекреационным комплексом любого уровня. В связи с этим, кластерный подход является оптимальным инструментом для обеспечения пространственного развития региона. Особенностью данного подхода является ориентация на создание конкурентных преимуществ участников кластера, способствующая разработке и внедрению инновационных проектов в туристскую индустрию [15]. В создании туристско-рекреационных кластеров важно учитывать традиции и культуру местного населения – социо-культурные условия, которые непосредственно влияют на индустрию гостеприимства [16]. В целом нужно отметить, что формирование региональных туристических кластеров способствует упорядочению туристических потоков в регионе, способствует оптимальной организации туристического бизнеса, преодолению стихийности в сфере оказания туристических услуг населению [17], потому что именно туристические кластеры влияют на формирование имиджа региона [18]. В туристическом ядре кластера дизайн зданий и традиционная архитектура привлекают странствующих посетителей, которые, в свою очередь, определяют место по этим значительным достопримечательностям [19]. Один из прибыльных источников в туризме создают художественные и архитектурные особенности, а также сочетание символов и историческо-культурного наследия, свидетельствующие о крепости и самобытности нации [20].

**Результаты исследования.** В процессе исследования был проведен анализ функцио-

нально-планировочных составляющих туристско-рекреационных кластеров в мировой практике. Рассмотрены туристско-рекреационные кластеры в Турции (Анталья), России (кластеры Зимней Олимпиады в Сочи), Мексике (Канкун), США (в Долине Напа) и Австралии (штат Квинсленд). С целью создания туристического ядра туристско-рекреационного кластера в Анталье (Турция) были построены новые отели, обеспечивающие высокий уровень обслуживания. Основой турецкого туристического продукта стала концепция «Все включено», которая повлияла на создание благоприятного имиджа всего региона. На территории России выделяются кластеры Зимней Олимпиады в Сочи. Создание данных кластеров оказало положительное влияние на приток инвестиций, развитие инфраструктуры, рост занятости населения, развитие мелкого и среднего предпринимательства, а также, на развитие зимних видов спорта в России. При формировании туристско-рекреационного кластера в Долине Напа (США) ключевую роль сыграло государственно-частное партнерство. В создании кластера Канкун (Мексика) государство взяло на себя роль инвестора, менеджера и разработчика проекта. Привлекательный образ туристско-рекреационного кластера в Квинсленде (Австралия) создан в результате совместной разработки стратегии развития и экологических программ.

Данные кластеры отличаются вместимостью, масштабами, составом участников и уровнем развития, но их объединяют доверительные

отношения, на основе которых осуществляется вся деятельность по продвижению регионов на внутреннем и международном рынке с участием государства и государственно-частного партнерства в их формировании.

В процессе анализа выявлены стартовые условия для формирования туристского кластера: миграция местного населения, неразвитая индустрия туризма, уменьшение туристских потоков и т.д.

На основе проведенного анализа мирового опыта в развитии туристско-рекреационных кластеров определены их основные составляющие (рис. 1):

1. Объект туристского интереса (достопримечательности, мероприятия, рестораны, размещения для туристов и транспорт);
2. Поддерживающие отрасли (местные товары и услуги, местный транспорт, ремесло и банковские услуги, маркетинговые агентства, поставщики продуктов, услуги по недвижимости, техническое обслуживание и поставщики оборудования);
3. Государственные и частные учреждения (правительственные агентства, местные туристические организации, учебные и научно-исследовательские учреждения и отраслевые учреждения (по наследию, туристические ассоциации и т.д.);
4. Смежные отрасли (медицинские услуги и продовольственный кластер).



Рис. 1. Основные составляющие кластера

В процессе исследования мировой практики туристско-рекреационных кластеров выявлены

следующие этапы в развитии кластеров: образование управляющей группы из представителей заинтересованных организаций, определение

стратегии развития, проведение семинаров, консультаций, рабочих встреч с местными жителями, работниками туристической и политической сфер, подготовка кадров, маркетинг и обеспечение безопасности.

В результате проведенного исследования мировой практики туристско-рекреационных кластеров выявлена сложная внутренняя структура кластера, развитие которой определяют следующие условия: природно-климатические, географические, культурно-исторические, социальные, экономические и политические. Также, проведенный анализ показал, что взаимосвязи между составляющими кластера являются определяющим фактором в формировании туристско-рекреационного кластера. Это выражается как во взаимосвязи основных услуг кластера, определяющей ядро кластера, так и во взаимосвязях государственных и частных учреждений определяющих пути его развития.

Формирование туристско-рекреационных кластеров, интегрированное в национальные и местные рамки стратегического планирования и предусматривающее оценку воздействия на окружающую среду, увеличивает устойчивое развитие туристической отрасли. Выполненное исследование подтвердило актуальность кластерного подхода в развитии сферы отдыха и путешествий. Также, выявлена необходимость перехода от развития единичных территорий с туристским потенциалом к устойчивому развитию территории региона, создавая синергетический эффект. Кроме этого, анализ также определил кластеры как точки роста и развития туристской инфраструктуры, активизирующих вокруг себя развитие малого и среднего бизнеса, обеспечивающих интенсивный прирост внутреннего и въездного туристских потоков, а также оказывающих мультипликативный эффект на развитие сферы сопутствующих услуг и смежных отраслей экономики.

Изучив процесс формирования кластера, было установлено, что это эффективный способ организации экономики и ее динамичного развития в условиях глобальной конкуренции. Специфика рекреационного потенциала позволяет определить специализацию туристско-рекреационных кластеров - культурно-познавательный туризм, пляжный отдых, приключенческий туризм и др. Различия в специализации кластеров дают им возможность, наряду с конкуренцией, успешно взаимодействовать, дополняя друг друга. Эта особенность создает предпосылки для формирования устойчивых территориальных систем межрегионального взаимодействия в сфере туризма на основе кластерного подхода.

Результаты проведенного анализа можно применить в будущем развитии туристско-рекреационных кластеров на территории Скадарского озера. В настоящее время большинство предпосылок, необходимых для существования кластеров, недостаточно развиты. Во-первых, необходимо совершенствование государственных и частных партнерств и привлечение всех заинтересованных участников для создания конкурентности. Во-вторых, нужно проведение исследований и четкое определение стратегии управления и развития туристско-рекреационных кластеров на территории Скадарского озера с учетом уже созданной среды. Также, нужно учитывать традиционные виды деятельности и обеспечить организацию инфраструктуры для предоставления разнообразных специализированных услуг посетителям. Особое внимание следует уделить развитию новых типов и форм размещения туристов, созданию транспортной системы, отвечающей принципам устойчивого развития, формированию инфраструктуры для проведения историко-культурных мероприятий. Так как Скадарское озеро принадлежит двум государствам, Черногории и Албании, предлагается создание совместного трансграничного туристско-рекреационного кластера.

**Выводы.** С целью сокращения сезонности, повышения конкурентоспособности, усиления туризма в континентальной части и как адекватный ответ на рыночные изменения, для будущего развития территории Скадарского озера предлагается кластерный подход. Туристско-рекреационные кластеры представляют собой гибкую систему со сложной внутренней структурой, в которой развиваются конкурентность и кооперация, подключается местное население, раскрывается потенциал местности, применяются принципы устойчивого развития и, таким образом улучшается как экономика, так и экология региона. Создание и развитие туристско-рекреационных кластеров на территории Скадарского озера позволит повысить уровень комфорта, ввести регламенты по организации туристических кластеров в условиях ценных природных территорий, станет новой нишей на туристическом рынке Черногории, которая сможет объединить интересы местного населения и туристов, а также малых и средних предпринимателей. Развитие туристско-рекреационных кластеров на территории Скадарского озера чрезвычайно важно как для улучшения жизни в сельской местности, так и для улучшения экономики страны.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колядин А.П. Формирование и развитие туристско-рекреационных кластеров как механизм повышения конкурентоспособности региональной экономики // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2018. № 4. С. 91–95.
2. Ермакова Ж.А., Холодилина Ю.Е. Пространственная организация туристской деятельности на основе кластерного подхода // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 8(183). С. 47–53.
3. Voiko M., Bosovska M., Vedmid N., Melnychenko S., Okhrimenko A. Development of the Tourism Cluster // Problems and Perspectives in Management. 2017. Vol. 15. No. 4. P. 134–149.
4. Ковалева И.В., Ульянов М.Н. Формирование туристско-рекреационного кластера в системе диверсификации региональной экономики // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 8. С. 178–182.
5. Maric I. Clusters as a Factor of Rural Tourism Competitiveness: Montenegro Experiences // Turizam. 2013. Vol. 17, No. 2. P. 84–95.
6. Maric I. The role and Challenges of Rural Tourism Development in Transition Countries: Montenegro Experiences // Business System Research. 2013. Vol. 4, No. 2. Pp. 94–107.
7. Волкова Т.А., Миненкова В.В., Беликов М.Ю., Пономаренко А.А. Туристские кластеры как пространственные модели организации туристско-рекреационной деятельности (на примере Черноморского побережья Краснодарского края) // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 133(09). С. 1–15.
8. Рудченко В.Н. Алгоритм и особенности построения кластеров в сфере туризма // Экономическая теория и институциональная экономика. 2014. № 2 (46). С. 5–12.
9. Дирин Д.А., Сеницына Е.Г., Кусков А.С. Кластерный подход к территориальной организации туризма // Известия АлтГУ. 2012. № 3-1. С. 109–113.
10. Ye H., Tussyadiah I. Tourists Transformation Experience: From Destination Architecture to Identity Formation // International Conference. 2010. p. 1–10.
11. Балакина А.Е., Дуничкин И.В., Кочанов О.А., Золотарев А.А. Экологически ориентированные курортно-оздоровительные и образовательно-рекреационные комплексы // Журнал «Промышленное и гражданское строительство». 2017. № 9. С. 30–32.
12. Балакина А.Е., Дуничкин И.В., Золотарев А.А., Кочанов О.А. Курортно-оздоровительные и образовательно-рекреационные комплексы экоселений России // Вестник МГСУ. 2011. № 1. С. 30–38.
13. Седова А.В., Балакина А.Е. Экологический туристско-рекреационный этнокластер «Бахчисарский» (Республика Крым): Целесообразность развития, специфика и перспективы уникального района // Научное обозрение. 2016. № 12. С. 22–26.
14. Tubic D., Britvic J., Jakovic B. Tourism Cluster - Promoter of Rural Development in Croatia // Interdisciplinary Management Research. 2015. Vol. 15. No. 4. Pp. 1077–1088.
15. Корабейников И.Н., Полякова И.Л. Особенности использования кластерного подхода для обеспечения пространственного развития региона // Экономика и управление в сфере услуг. 2013. № 12. С. 355–359.
16. Клочкова Т.В. Кластеры: понятие, виды, условия возникновения и функционирования // Вестник МФЮА. 2012. № 2. С. 52–61.
17. Курченко В.В., Фетисова О.В., Тютюшева А.Г., Матина Е.С. Проблемы типологии региональных туристических кластеров // Вестник АГТУ. 2016. № 1. С. 7–13.
18. Рудченко В.Н. Кластеры в туризме: Особенности классификации, процесс формирования и методы оценки // Общество, среда, развитие. 2016. № 4. С. 12–18.
19. Scerri, Moira&Edwards, Deborah&Foley, Carmel The Value of Architecture to Tourism // 26<sup>th</sup> Annual CAUTHE Conference. 2016. Pp. 1–21.
20. Taheri G., Emamgholi A. Tourism improvements based on sustainable architecture and new functions of textures and historical buildings and their alterations // Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege. 2017. № 86. p. 831–844.

*Информация об авторах*

**Хербез Веленка**, магистр архитектуры, аспирант. E-mail: v.herbez@yahoo.com. Московский Государственный Строительный Университет, МГСУ. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

*Поступила 14.03.2021 г.*

© Хербез В., 2021

**Herbez V.**

Moscow State University of Civil Engineering

E-mail: v.herbez@yahoo.com

**ON THE FORMATION OF TOURIST AND RECREATION CLUSTERS  
IN THE CONDITIONS OF HISTORICAL AND NATURAL RESERVES  
(ON THE EXAMPLE OF LAKE SKADAR IN MONTENEGRO)**

**Abstract.** *Lake Skadar in Montenegro is a unique natural resource that combines a favorable climate, good geographical position, diverse flora and fauna, numerous cultural and historical monuments located throughout the basin. This valuable natural resource is a new and undeveloped tourist niche in Montenegro. It requires a special approach, taking into account the socio-cultural environment and the principles of sustainable development. The cluster approach is one of the outstanding ways of organizing and structuring in tourism. Consequently, the possibility of creating tourist and recreational clusters on the territory of the Lake Skadar reserve in Montenegro is considered as a new multicomponent structure integrated into the national and local strategic planning frameworks, increasing the viability of tourism activities and providing a synergistic effect on tourism and related services. An analysis is carried out to determine the main components of tourist and recreational clusters necessary for the transition from the development of individual territories with a tourist potential to the sustainable development of the territory of Lake Skadar, creating a synergistic effect. The analysis confirmed the need for a strategic and systematic approach in the sustainable development of Lake Skadar and the use of its potentials, as well as the relevance of the cluster approach in the development of recreation and travel. Also, the study carried out confirmed that the lake should be considered as a whole and that tourism and recreation clusters represent the most efficient and flexible structures that will benefit both nature and the visitor.*

**Keywords:** *clusters, tourist core, sustainability, reserves, synergy.*

**REFERENCES**

1. Kolyadin A.P. Formations and development of tourist and recreational clusters as a mechanism for increasing the competitiveness of the regional economy [Formirovaniye i razvitiye turistsko-rekreatsionnykh klasterov kak mekhanizm povysheniya konkurentosposobnosti regionalnoy ekonomiki]. Khar'kov: The problems of Economy. State and municipal management. Scholarly notes. 2018. No. 4. Pp. 91–95. (rus)
2. Yermakova ZH.A., Kholodilina YU.Ye. Spatial organization of tourist activity based on the cluster approach [Prostranstvennaya organizatsiya turistskoy deyatelnosti na osnove klasterogo podkhoda]. Orenburg: Bulletin of the Orenburg State University. 2015. No.8. Pp. 47–53. (rus)
3. Boiko M., Bosovska M., Vedmid N., Melnychenko S., Okhrimenko A. Development of the Tourism Cluster. Problems and Perspectives in Management. 2017. Vol. 15. No. 4. Pp. 134–149.
4. Kovaleva I.V., Ulyanov M.N. Formation of tourist and recreational clusters in the system of diversification of the regional economy [Formirovanie turistsko-rekreatsionnogo klastera v sisteme diversifikatsii regionalnoy ekonomiki]. Altai: Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2017. No.8. Pp. 178–182. (rus)
5. Maric I. Clusters as a Factor of Rural Tourism Competitiveness: Montenegro Experiences. Business System Research. 2013. Vol. 4, No. 2. Pp. 94–107.
6. Maric I. The role and Challenges of Rural Tourism Development in Transition Countries: Montenegro Experiences. Business System Research. 2013. Vol. 4, No. 2. Pp. 94–107.
7. Volkova T.A., Minenkova V.V., Belikov M.YU., Ponomarenko A.A. Tourist clusters as a spatial models of organizing tourist and recreational activities (on the example of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory) [Turistskiye klasteriy kak prostranstvennyye modeli organizatsii turistsko-rekreatsionnoy deyatelnosti(na primere Chernomorskogo poberezhya Krasnodarskogo kraya)]. Kuban: Scientific journal of KubGAU. 2017. No. 133(09). Pp. 1–15. (rus)
8. Rudchenko V.N. Algorithm and features of building clusters in tourism [Algoritm i osobennosti postroyeniya klasterov v sfere turizma]. Sankt-Peterburg: Economic theory and institutional economics. 2014. No. 2(46). Pp. 5–12. (rus)
9. Dirin D.A., Sinitsyna Ye.G., Kuskov A.S. Cluster approach to the territorial organization of tourism [Klasternyy podkhod k territorialnoy organizatsii turizma]. Altai: Izvesiya AltSU. 2012. No. 3-1. Pp. 109–113. (rus)
10. Balakina A.Ye., Dunichkin I.V., Kochanov O.A., Zolotarev A.A. Environmental oriented health resort and educational and recreational complexes [Ekologicheski oriyentirovannyye kurortno-ozdorovitelnyye i obrazovatelno-rekreatsionnyye komplekxy]. Moscow: Industrial and Civil Construction Journal. 2017. No. 9. Pp. 30–32. (rus)

11. Ye H., Tussyadiah I. Tourists Transformation Experience: From Destination Architecture to Identity Formation. International Conference. 2010. Pp. 1–10.

12. Balakina A. Ye., Dunichkin I. V., Zolotarev A. A., Kochanov O. A. Health resort and educational and recreational complexes of ecovillages of Russia [Kurortno-ozdorovitelnyye i obrazovatelno-rekreatsionnyye komplekсы ekoposeleniy Rossii]. Moscow: Vestnik MGSU. 2011. No. 1. Pp. 30–38. (rus)

13. Sedova A. V., Balakina A. Ye. Ecological tourist and recreational ethnocluster «Bakhchisar'skiy» (Republic of Crimea): Feasibility of development, specificity and prospects of a unique area [Ekologicheskiy turistsko-rekreatsionnyy etnoklaster «Bakhchisar'skiy» (Respublika Krym): Tselesoobraznost razvitiya, spetsifika i perspektivy unikal'nogo rayona]. Moscow: Scientific Review. 2016. No. 12. Pp. 22–26. (rus)

14. Trubic D., Britvic J., Jakovic B. Tourism Cluster - Promoter of Rural Development in Croatia. Interdisciplinary Management Research. 2015. Vol. 15. No. 4. Pp. 1077–1088.

15. Korabeynikov I. N., Polyakova I. L. Features of the use of the cluster approach to ensure the spatial development of the region [Osobennosti

ispol'zovaniya klaster'nogo podkhoda dlya obespecheniya prostranstvennogo razvitiya regiona]. Sankt Petersburg: Economy and management in the service sector. 2013. No. 12. Pp. 355–359. (rus)

16. Klochkova T. V. Clusters: concept, types, conditions of emergence and functioning [Klaster'y: ponyatiye, vidy, usloviya vozniknoveniya i funktsionirovaniya]. Moscow: Vestnik MFYuA. 2012. No. 2. Pp. 52–62. (rus)

17. Kurchenko V. V., Fetisova O. V., Tyutyusheva A. G., Matina Ye. S. Problems of typology of regional tourist clusters [Problemy tipologii regional'nykh turisticheskikh klasterov]. Astrakhan: Vestnik AGTU. 2016. No. 1. Pp. 7–13. (rus)

18. Rudchenko V. N. Clusters in tourism: Features of the classification, the process of formation and methods of assessment [Klaster'y v turizme: Osobennosti klassifikatsii, protsess formirovaniya i metody otsenki]. Sankt Petersburg: Society, environment, development. 2016. No. 4. Pp. 12–18. (rus)

19. Scerri, Moira & Edwards, Deborah & Foley, Carmel The Value of Architecture to Tourism. 26<sup>th</sup> Annual CAUTHE Conference. 2016. Pp. 1–21.

20. Taheri G., Emamgholi A. Tourism improvements based on sustainable architecture and new functions of textures and historical buildings and their alterations. Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege. 2017. No. 86. Pp. 831–844.

#### *Information about the authors*

**Herbez, Velenka.** Master of Architecture, PhD student. E-mail: v.herbez@yahoo.com. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

---

*Received 14.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Хербез В. О формировании туристско-рекреационных кластеров в условиях историко-природных заповедников (на примере Скадарского озера в Черногории) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 46–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-46-52

#### **For citation:**

Herbez V. On the formation of tourist and recreation clusters in the conditions of historical and natural reserves (on the example of lake Skadar in Montenegro). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 46–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-46-52

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-53-65

<sup>1</sup>Банцерава О.Л., <sup>2</sup>Садыкова С.Ш., <sup>1,\*</sup>Касимова А.Р.<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет<sup>2</sup>Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева

\*E-mail: adema-23352@inbox.ru

## ПРОБЛЕМЫ ВОЗРОЖДЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ СЕЛЬСКОГО ЖИЛИЩА РОССИЙСКО-КАЗАХСТАНСКОГО ПРИГРАНИЧЬЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются проблемы сохранения и возрождения исторических и национальных традиций в архитектуре сельского жилища этносов Российско-Казахстанского приграничья. Актуальность исследования обусловлена мировыми процессами глобализации, ростом численности населения городов и постепенной утратой уникальных объектов материальной культуры в сельской местности. Целью исследования является выявление объемно-планировочных и архитектурно-художественных особенностей сельских жилищ русского, казахского, татарского и башкирского народов Российско-Казахстанского приграничья. В научной работе были применены следующие методы: натурные наблюдения существующих зданий и сооружений на исследуемой территории, изучение природно-климатических и ландшафтных характеристик местности, сравнительный анализ установившихся типов жилища этносов. В рамках исследования рассмотрены архитектурно-художественные решения фасадов традиционных жилищ разных народов, особенности организации интерьерных пространств, их композиционное и колористическое решение и прослежена взаимосвязь исторически сложившихся приемов с современными методами строительства жилых домов сельского населения региона. В результате исследования был сделан вывод о том, что происходит частичная потеря идентичности, сглаживание национальных особенностей в объемно-планировочном и архитектурно-художественном решении жилища этносов на исследуемой территории. В то же время сохранение и возрождение национальных особенностей поможет не только обогатить архитектуру сельского жилища, но и будет способствовать повышению туристского интереса и развитию этнокультурного туризма в Российско-Казахстанском приграничье.

**Ключевые слова:** объемно-планировочные и архитектурно-художественные особенности, сельское жилище, изба, юрта, Российско-Казахстанское приграничье, этнокультурный туризм.

**Введение.** Развитие архитектуры жилища во многом связано с различными культурными и социально-экономическими тенденциями, происходящими в обществе. Одной из важных проблем в сельской архитектуре жилища современного периода является возрождение и возврат к историческим и национальным традициям строительства зданий и сооружений. Данная проблема наметилась в связи с мировыми процессами глобализации и роста численности городского населения. Термин «глобализация» расшифровывается, как «усиление процессов взаимозависимости, взаимопроникновения и взаимообусловленности экономических, политических, правовых, идеологических, культурных компонентов мирового сообщества», который свидетельствует, о том, что происходит стирание ярких национальных особенностей архитектуры различных культур и, как следствие, - создание единой, безликой архитектуры [1]. Стремлению сохранить самобытность соответствует формирование стилистических направлений в архитектуре, таких как регионализм, историзм. Этому способствуют также широкая организация в различных странах конференций, встреч, симпозиумов, семинаров, вы-

ставок по национальным вопросам и этнографическим исследованиям. Кроме того, развитие этнокультурного туризма в различных странах создает условия для возрождения национальных особенностей в архитектуре. Для регионов, в которых необходимо возрождать историческое культурное наследие данная проблематика особенно актуальна. Как было ранее выявлено, Российско-Казахстанское приграничье, как часть Евразийского пространства, обладает множеством сохранившихся объектов культурного материального и нематериального наследия различных этносов, среди которых особое значение играет нематериальное в виде обрядов, ритуалов и праздников, а также ведение традиционной хозяйственно-бытовой деятельности, что представляет несомненный интерес для этнокультурного туризма [2]. Этнический состав Российско-Казахстанского приграничья многообразен. К народам, сохранившим самобытное культурное наследие в основном, относятся русские, казахи, татары и башкиры. В Российско-Казахстанском приграничье, в частности в таких областях, как Астраханская, Волгоградская, Саратовская, а также Западно-Казахстанская, Атырауская и Актюбинская преобладает казахское и русское

население, а в Самарской и Оренбургской областях проживает в основном татарские и башкирские народы. Несмотря на многовековые процессы взаимовлияния соседствующих народов, общность пройденного ими исторического пути, этносам во многом удалось сохранить культуру и быт, которые проявились в формировании пространства современного сельского жилища и его архитектурно-художественном решении. Таким образом, целью данного исследования является выявление национальных особенностей сельского жилища, возрождение и сохранение самобытности в современной архитектуре жилых домов различных этносов Российско-Казахстанского приграничного региона.

**Материалы и методы.** Основными методами исследования являются натурные наблюдения, фотофиксация существующих зданий и сооружений на исследуемой территории, изучение природно-климатических и ландшафтных характеристик местности, сравнительный анализ исторически сложившихся традиционных типов жилища различных народов, проживающих в Российско-Казахстанском приграничье.

**Основная часть.** Национальные особенности архитектуры, как отмечает Яралов Ю.С. в монографии «Национальное и интернациональное в советской архитектуре», складывались под влиянием таких факторов, как природно-климатические и географические условия, строительные материалы, социально-экономическая и историческая среда, строительные и художественные традиции, развитие техники и технологий, менталитет народа, как совокупность представлений, критериев оценок и вкусов произведений архитектуры, а также синтез различных искусств [3].

Рассматриваемый регион отличается резко-континентальным, засушливым климатом, высоким уровнем температуры наружного воздуха в летний и зимний периоды (средняя температура июля в регионе + 23 °С, средняя температура января в регионе - 12 °С), большим значением среднегодовой скорости ветра (3,16 м/с), значительным показателем суммарной годовой солнечной радиации (от 1100 до 1200 кВт·ч/м<sup>2</sup>), незначительным уровнем суммы годовых осадков (от 413 до 253 мм) и комфортным значением относительной влажности воздуха в год (от 65 до 74 %). Местность Российско-Казахстанского приграничья в основном равнинная, изредка характеризующаяся возвышенностями, оврагами и балками, лесистость территории составляет около 4 %, а территория располагается в основном в лесостепной, степной и полупустынной природных зонах [4, 5]. Например, в Самарской области, где преобладает лесостепная природная зона средняя температура в январе равняется -14,5 °С, а в июле +26,8 °С, наибольшее количество осадков в году наблюдается в октябре – 48,8 мм, в то время как в Атырауской области, где преобладает полупустынная природная зона, средняя температура в январе имеет отметку в - 4,9 °С, а в июле + 34,2 °С и максимальное количество осадков в году выпадает в мае – 17,9 мм (рис. 1). Природно-климатические и географические условия региона в большей степени влияют на способы строительства, конструктивные и архитектурно-планировочные особенности зданий и построек, вследствие необходимости защиты от неблагоприятного внешнего воздействия и формирования комфортного пространства.

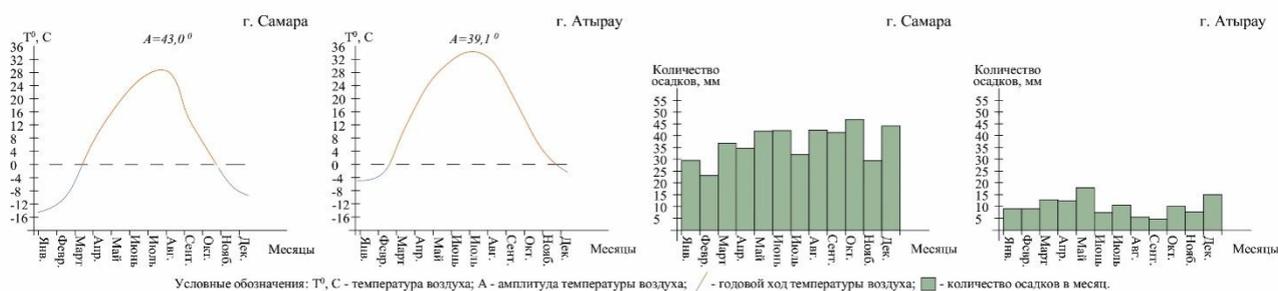


Рис. 1. Сравнительные характеристики климата Самарской и Атырауской областей (авторская иллюстрация)

Проследим развитие объемно-планировочного решения сельского жилища русского, татарского и башкирского населения в Российско-Казахстанском приграничье начиная с XIX в. по настоящее время (рис. 2–5).

Для жилища татарского народа был характерен бревенчатый четырехстенный или шестистенный сруб, покрытый двухскатной крышей [6]. Торцевой фасад жилых домов старой по-

стройки, имевший как правило три окна, был обращен к улице. В настоящее время распространенным типом жилища являются трехкамерные дома: изба-сени-клеть или изба-сени-изба, также иногда встречаются дома крестообразной формы в плане. Изменение площади подобного жилого дома связано с пристройкой различных помещений, которые могут формировать, как симметричный, так ассиметричный объем. Новые по-

стройки, как правило, строят больших по площади и объёму размеров по сравнению с традиционными. Фасад, обращенный на улицу, имеет

5–6 окон, а кровля может иметь крутой уклон и сложную форму с мансардным этажом [7].

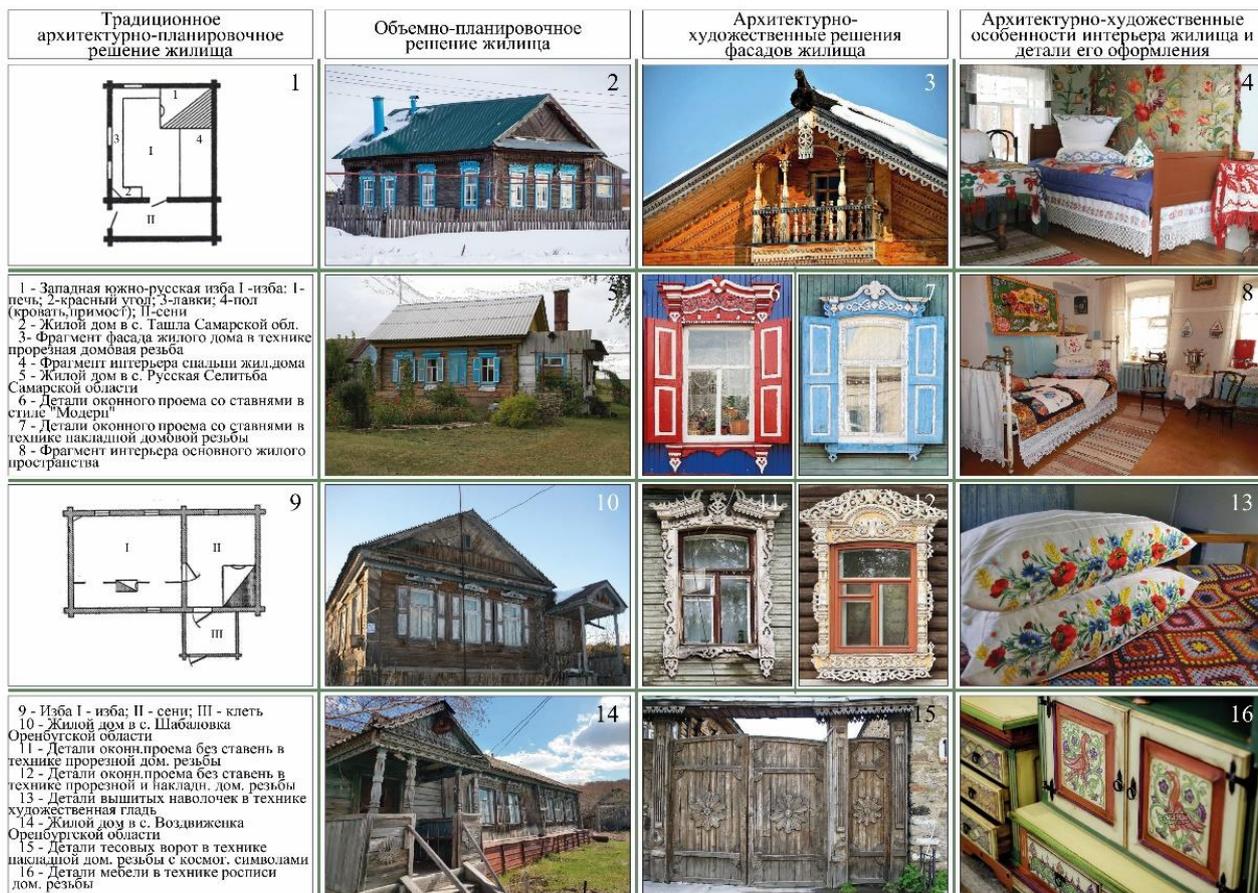


Рис. 2. Характерные приемы организации сельского жилища русского народа, применяемые в настоящее время в Российско-Казахстанском приграничье (авторская таблица)

Для жилища русских традиционным является деревянная изба-пятистенок с двух или четырехскатной (шатровой) крышей [6, 8]. В современном русском жилом доме на фасаде, ориентированном на улицу, количество окон равняется 2-3, а крыша, как правило, двухскатная с ломаным скатом или совмещённая с крышей над пристройкой.

Техника домостроительства башкир, перенятая у русских, имела много общего в формировании объемно-пространственного решения избы. Так для башкирского жилища характерно в настоящее время двухкамерное пространство со встроенной стеной (изба-пятистенок), покрытое шатровой крышей.

Жилище татарского, русского и башкирского народов, населяющих РКП, совершенствовало свою конструктивную и объемно-планировочную структуры за счет изменения соотношения размеров основного объема и пристройки, изменения конфигурации здания в плане.

В связи с переходом к оседлому образу жизни казахи Российско-Казахстанского приграничья перенимали опыт строительства

стационарных жилищ у оседлых народов, среди которых были русские, украинцы, татары, башкиры и др. Казахский стационарный жилой дом в короткий период от построек земляночного, полуземляночного типа и сооружений, напоминающих по своим формам юрту, прошел к «там уй», а затем и к деревянным «агаш уй». Жилище «там уй» выполнялось из саманного или сырцового кирпича, оно имело фундамент из камня или щебня, стены из кирпича толщина которого варьировалась от 10 до 20 см, окна выполнялись из стекол, кровлю сооружали из деревянных балок, которые сверху накрывались камышом и уплотнялись дерном или глиной [9]. Стены «там уй» оштукатуривались, как снаружи, так и внутри, а в кровле нередко сооружали отверстие для отвода дыма. В настоящее время по типу «там уй» сооружаются различные хозяйственно-бытовые постройки или сооружения в казахской усадьбе. Деревянные дома «агаш уй», возникавшие в конце XVIII – начале XIX в. как и татарские, русские и башкирские жилища имели двух или трехкамерное деление дома на избу-

сени-клеть или избу-сени-избу, кровля зачастую была полого-двухскатная или редко двухскатная [9]. Современные «агаш уй», сменив основной строительный материал (с дерева на

обожженный кирпич), остались в основном неизменными в объемно-пространственном решении жилого казахского дома.

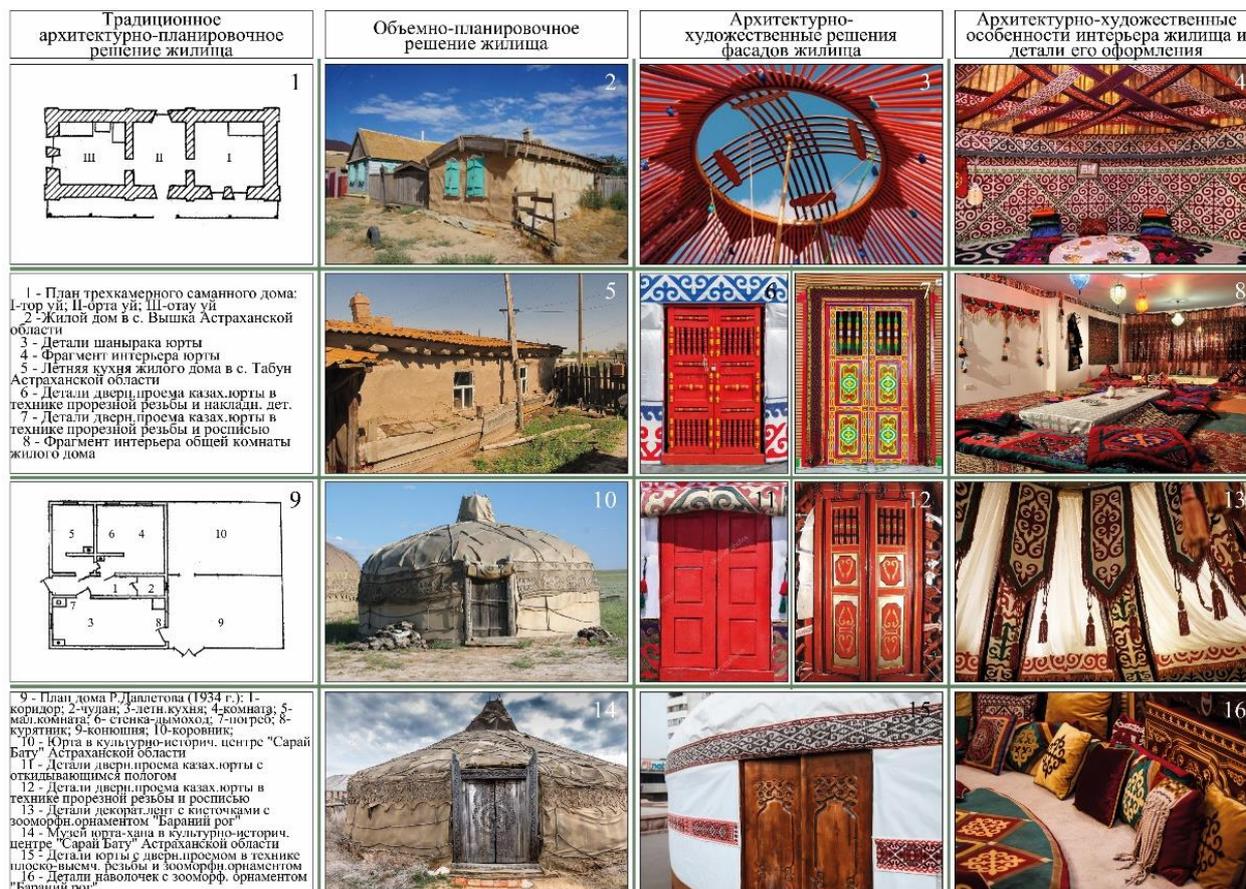


Рис. 3. Характерные приемы организации сельского жилища казахского народа, применяемые в настоящее время в Российско-Казахстанском приграничье (авторская таблица)

Распространенным традиционным типом внутренней планировки и формирования интерьера жилища русского населения исследуемого региона являлся общерусский тип, который характеризовался расположением печи справа от входа и направлением ее устья к боковой стене. По диагонали от печи устраивался передний – «красный» угол, в котором размещались иконы. В переднем углу стоял большой стол, а вдоль стен – широкие лавки. Рядом с печью над входом располагались полати, а пространство за печью предназначалось для женщин, которое отгораживалось занавеской или деревянной перегородкой. Стены, простенки и углы жилища украшались тканями и вышитыми полотенцами, салфетками, скатертями и молитвенниками, особое место занимал сундук, где хранились одежды и драгоценные вещи. На большинстве предметов быта была нанесена искусная роспись с сохранением естественного цвета древесины и разнообразной поверхностью за счет света и полутени на узорчатой резьбе. Ведущей цветовой гаммой интерьера жилища

была золотисто-охристая с введением белого и красного цветов. Белыми были полотенца на иконах, красный цвет небольшими пятнами сверкал на одежде, полотенцах, в росписях домашней утвари и др. Русский орнамент отличался наличием множества его видов: геометрического, антропоморфного, зооморфного и растительного мотивов, который сохранился в настоящее время [7, 12, 13].

Внутренняя планировка и интерьер татарского жилища имела схожий характер с русской организацией дома. Дом отапливался печью, которая была зачастую комбинацией из русской печи и пристроенной к ней глинобитным очагом с одним или двумя вмазанными котлами. Печь располагалась на некотором расстоянии от стен, образуя проход на женскую половину дома. Устье печи, обычно, как и в русском варианте, обращалось к боковой стене. В соответствии с общетюркскими традициями, как и в юрте, у татар сохранился особый способ отделения женской («почмак як») и мужской («тур») частей жилища. Таким образом, площадь избы

разделялась по линии печи капитальной перегородкой или занавесью «чаршау» на кухонную (женскую) и гостевую (мужскую) половины. Татарская печь имела ряд специфических особенностей: она ставилась на небольшое деревянное основание, имела сравнительно низко поставленное отверстие шестка для устройства трубы-дымохода, а также пространство над печью использовалось для складирования различной домашней утвари. Для интерьера были характерны встроенные лавки, полки, нары. Общесемейный стол ставился у одной из стен, либо в центре комнаты. Как и в русском жилище, татарский дом имел богато украшенные поверхности стен сотканными скатертями и салфетками. Атрибутом интерьера

являлся «шамаиль» - написанный на стекле, холсте, бумаге или вышитый на ткани текст из Корана. Жилище отличалось обилием перин и пуховых подушек, цветами на подоконниках и устланными на полу дорожками и коврами. Особое место в интерьере занимал красный или зеленый сундук, где хранились одежда, ткани, драгоценности и др. ценные вещи. Все предметы интерьера татарского жилища богато украшались узорами и орнаментами. Специфической чертой татарского орнамента сегодня является преобладание цветочно-растительных и геометрических мотивов и отсутствие зооморфного сюжета. В цветовой гамме жилища применяется зеленый, синий, красный и желтые цвета [7, 13, 14].



Рис. 4. Характерные приемы организации сельского жилища татарского народа, применяемые в настоящее время в Российско-Казахстанском приграничье (авторская таблица)

Планировочная организация внутреннего пространства башкирского жилища имела много общего с общерусским типом планировки и имела отдельные характерные элементы татарского дома. В интерьере, как и в русском жилище, значительная роль отводилась печке. Ее обычно располагали у двери с небольшим отступом и первоначально она имела простую конструкцию и сочетала в себе очаг с котлом, а в последующем стали применяться печи по

татарскому образцу. В избах башкирского народа наблюдалось разделение жилой площади на «чистую» (гостевую) половину и кухню. Отличительным элементом убранства дома являлся деревянный дощатый настил – нары. Они занимали значительную площадь, встраивались между стенами, достигая ширины до 2 м. Также, кроме основных нар у входа устраивали дополнительные короткие. Доски нар устилали войлоком, поверх которых клали безворсовые

домотканые ковры, стеганные подстилки и др. В гостевой половине размещались сундуки на деревянных подставках с паласами, кошмами, одеялами и т.д. Стены увешивались вышитыми полотенцами, ковриками, занавесками. Перед устьем печи, обращенным к передней стене, всегда оставлялось пространство, отделенное занавесом. Здесь находился небольшой помост для разделки пищи, хранения посуды и продовольственных запасов. Убранство башкирского жилища зачастую сохранило свои традиционные черты и отличается преобладанием геометрического, растительного и зооморфного орнаментов, с применением красного, жёлтого, черного и зеленого цветов. В интерьере при украшении различных предметов быта реже встречаются голубой, синий, алый и оранжевый, в отличие от жилища других народов [10, 15].

Современное внутреннее пространство жилища русского, татарского и башкирского населения в основном сохранило характерные традиционные черты, такие как выделение «чистой» половины жилища. Однако расширение жилой части дома привело в настоящее время к многокомнатности и функциональному разделению помещений, когда

каждое помещение предназначено для определенных бытовых процессов (общая комната или «зал», спальни, а также кухня, столовая и т.д.) Общий план дома усложнился за счет пристройки сеней, коридора, веранды или крыльца, а печь стала располагаться в задней части дома и с появлением газового отопления перестала служить для обогрева жилого пространства и стала использоваться для приготовления пищи, подогрева воды или для приготовления корма скоту или птице. Наряду с изменениями во внутренней планировке жилища русского, татарского и башкирского населения произошли изменения в обстановке и убранстве дома. Сельские дома зачастую обставляются мебелью по городскому типу: шифоньеры, кресла, кровати, журнальные столики и т.д., внутренний периметр стен в большинстве случаев покрашен, побелен или оклеен обоями. Сундуки ставят уже в задней части дома, либо у задней стены, на веранде. В них хранят вышедшие из употребления всевозможные занавеси, домотканые полотенца, скатерти, салфетки и т.д. [16]. Однако, в некоторых башкирских домах старой постройки наряду с кроватями сохраняется устройство нар.

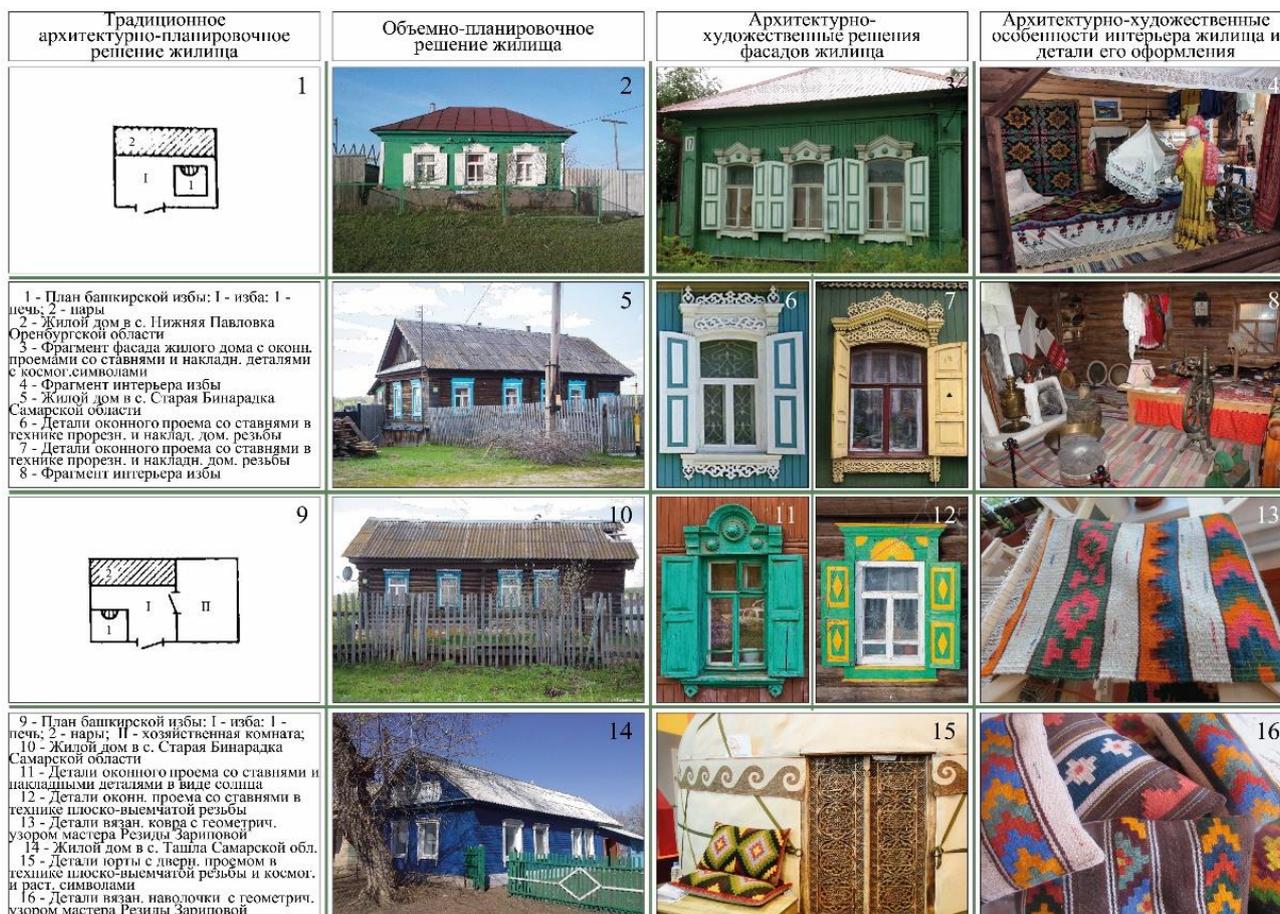


Рис. 5. Характерные приемы организации сельского жилища башкирского народа, применяемые в настоящее время в Российско-Казахстанском приграничье (авторская таблица)

В планировочной организации интерьера жилища казахов также огромное значение имела печь, которая отапливала помещение и служила для приготовления пищи. Ее как правило располагали посередине помещения, тем самым деля комнату на две части: пространство ближе ко входу служило прихожей и кухней, другая часть пространства была жилой комнатой. Печь была низкой с вмазанным как у татар и башкир котлом. Интерьер казахского дома характеризовался отсутствием большого количества мебели. Ковры, кошмы, матрацы и тюфяки заменяли предметы убранства и мебели. Пол устилали кошмой из овечьей шерсти. Спальные места сооружались на шерстяных матрацах, обтянутых тканью («курпе»). Обеденный стол заменяли низкие столики или скатерти («дастархан»), постеленные на пол. Для складывания подушек и матрацев применялись сундуки. Почетное место для гостей в центре общей комнаты покрывалось поверх простой кошмы коврами или войлочными подстилками. Характерной деталью казахского интерьера стационарного жилища, перенятого из убранства юрты, было оформление предметов быта различными орнаментами и всевозможным декором. Внутреннее пространство юрты всегда имело яркое и интенсивное насыщение цветом и орнаментацией различных поверхностей пола и стен. Ковры, кошмы, паласы, чехлы подушек, стеганные одеяла украшаются узорами. Основными цветовыми сочетаниями являлись холодный красный, синий и серый фон, а в качестве рисунка орнамента применялись темно-коричневый и черный цвета. Среди различных типов орнамента для казахского характерны зооморфный, геометрический, растительный и космогонический. Орнамент исполнялся в различных техниках: был вырезан на дереве при изготовлении посуды, гравирован или припаян на металле для украшения сундуков, вкатан или вшит в войлок, вышит на ткани или на ворсовом ковре и др. [17, 18].

Современная планировка и интерьерное решение казахского дома претерпели изменения, как и у других народов в направлении расширения помещений и увеличения количества комнат. Так для формирования общей комнаты выделяются значительные площади (средняя площадь 28–36 м<sup>2</sup>, нередко встречаются комнаты площадью 42–48 м<sup>2</sup>). Это объясняется сохранением традиций проведения семейных торжеств с большим количеством приглашенных, а также проживанием в течение длительного срока родственников семьи. В тоже время многофункциональность помещений сохранилась в современных жилищах. Она

выражается в трансформации функциональной организации пространства за счет переноса матрасов и низеньких столиков или скатертей из одного помещения в другое. Так комнаты для встречи гостей и общесемейного отдыха домочадцев, могут использоваться при надобности в качестве спален или кухонь. Если в вопросе планировочной организации казахского жилого дома произошли изменения, то в убранстве жилища, сохраняется этническое своеобразие. Предметы быта, среди которых ковры, паласы, чехлы подушек, одеяла и др. остаются богато украшенные орнаментами. Однако вследствие развития технологий и заводского производства тканей наблюдается большее, чем раньше разнообразие цветов, таких как голубой, белый, желтый, красный, зеленый, черный, синий и их полутонов.

Архитектурно-художественные особенности оформления фасадов домов русского, татарского и башкирского народов заключаются в разнообразном декоре (рис. 2–5).

В русских домах приемы украшения фасадов основаны на деревянной резьбе, которой покрывались отдельные детали: ставни оконных проемов, наличники и полотна дверей, подзоры кровель. Жилище, как правило, оставаясь неокрашенным с поверхностью рубленых стен здания создавало единую композицию с теплым тоном обработанного дерева в деталях [19]. Оконные проемы имели размеры 0,4×0,6 м, тогда как сейчас дома характеризуются наличием больших окон (0,8×1,2 м; 0,9×1,2 м и т.д.). Архитектурная резьба на различных декоративных элементах выполнялась в традиционных мотивах – геометрическом, растительном, зооморфном типах. В современных русских жилищах декоративные элементы здания при меньшем использовании резьбы и ее упрощении, покрываются краской. Преимущественно используются белый, синий, зелёный, иногда желтый и красно-коричневые цвета. Для русской усадьбы были характерны высокие глухие ворота с калиткой, выполненные из вертикально поставленных досок, украшенных также резьбой и иногда накрытых двухскатной кровлей. Однако, в настоящее время входные элементы усадьбы, как ворота и калитка в меньшей степени декорированы и при их строительстве используются современные строительные материалы, такие как сетки, перфорированные металлические листы, пластик и др.

В жилых домах татарского населения деревянная резьба играла менее важную роль. В художественно-декоративном украшении, активно применялись цвет и техника накладного

декора. В татарском жилище в цвете решалось все, начиная от жилого дома и заканчивая хозяйственными и бытовыми постройками, выходящими на улицу. Особенностью традиционного оформления фасадов жилых домов являлись следующие приемы колористики: полихромность цветового решения с выбором характерной гаммы цветов (зеленого, голубого, желтого и белого, как акцентных – синего и красного), а также использование принципа чередования цветов (большими плоскостями или раскраской «в полоску») [20]. Как отмечают исследователи Аитов Р.Р., Афанасьева Е.А. и Токмакова Г.Ю в татарской сельской жилой архитектуре цветовая проработка поверхностей строений и их деталей связана с приемами пластической декоративной отделки, т.е. «цвет использовался как композиционно-художественное средство, выявляющее структуру сооружения» [8]. Наблюдалась традиционная отделка поверхностей – обшивка досками плоскостей стен, углов и фронтона дома, украшение декором наличников с элементами накладной резьбы, карнизов, подзоров кровель и др. Накладной декор осуществлялся в геометрическом и растительном мотиве с применением элементов в виде ромбов, квадратов, кругов, растений и др. Торцевые фронтоны и нижняя подшивка скатной кровли оформлялась резным или ажурным способом. Оконные проемы, как правило имели размеры 0,6×0,9 м, а полотна входных дверей филенчатые одностворчатые, иногда двухстворчатые украшались накладными элементами или окрашивались исходя из общего колористического решения дома. Особое внимание уделялось декору наличников оконных проемов различными узорами цветочного орнамента. В настоящее время декоративная отделка фронтона в основном имеет упрощенный вариант, когда фронтонное окно выявляется без создания фронтонной ниши. Это связано с формированием целостной композиции уличного фасада здания при снижении высоты заборов перед ним, заменой его решеткой или сеткой. Огороженное забором или высаженными деревьями, пространство перед уличным фасадом дома является характерным отличием традиционного татарского жилища с расположением постройки в глубине усадьбы. В тоже время в связи с появлением новых строительных материалов происходит смена деревянных стен на кирпичные, а вместо обшивки фасада деревянными досками методом «в елочку» им на смену приходит сайдинг. Таким образом, часто наличники выполняют из листового железа или цветного профильного

листа. Также, стоит отметить, что в последнее время стали появляться дома, выполненные из красного кирпича с применением белого силикатного для украшения фасадов домов и декорирования оконных проемов. Однако, ворота в современных усадьбах, как значимый элемент усадьбы тщательно воспроизводятся в традиционных формах. Одним из распространенных вариантов на данный момент являются ворота на трех столбах со скатной кровлей. На столбах крепятся полотнища ворот и калитки и над калиткой или всеми полотнищами устанавливается ажурная решетка или общий скат [20].

Фасад дома башкирского населения, обращенный к улице, имел большую орнаментальность чем противоположная сторона дома, выходящая во двор усадьбы. На фасаде наиболее декорированным элементом были наличники окон, ставни, фронтоны. Примечательно то, что башкирский декор в технике исполнения был схож с русским, т.е. применялись различные приемы резьбы. В основном на наличниках оконных проемов размещался зооморфный орнамент, изображавший фазанов, тетеревов, куниц, крылатых коней и др., а также космогонический с солярными узорами. Также, широко распространены геометрические знаки – ромбы, прямоугольники, треугольники и др. При оформлении башкирского жилища старались сохранить натуральный цвет дерева, поэтому резные элементы декора оставляли неокрашенными. Однако, цвет присутствовал в украшении дома. Наиболее характерными были белый, голубой, зеленый, желтый цвета и их полутона. Как и в русском жилище, со стороны улицы в башкирской усадьбе устраивался глухой забор с калиткой, изредка украшенный резьбой. В настоящее время архитектурный декор башкирских домов многообразен, наряду с резьбой сочетается покраска поверхностей и отдельных элементов, фигурной рустовкой заделывается фронтоны, на зашитых досками стенах появляются многоцветные аппликации и в нем сохраняются орнаментальные зооморфные и космогонические мотивы [15].

Внешнее оформление стационарных казахских домов в период их формирования и в последующем отличался отсутствием какого-либо декора в художественном оформлении фасадов зданий и сдержанным колористическим решением. Данное явление прослеживается при исследовании исторического типа жилища казахов – юрты. Отмечается, что экстерьер юрты характеризовался спокойным цветовым решением и интегрированной в ландшафт

формой, в отличие от интерьерного пространства кочевого жилища. Как правило, юрты покрывались кошмой, сотканной из натуральной шерсти верблюдов или овец, имевших волокна бежевого, светло-коричневого цвета. В цветовом оформлении стационарного жилища казахи старались сохранить натуральный цвет дерева, но в тех домах, где применялась саманная техника строительства подобные здания белились, а отдельные элементы, такие как наличники оконных проемов оформляли цветом и накладными декоративными деталями, ставни в большинстве случаев отсутствовали. Жилища в основном белились до основания фронтона, а сам фронтон здания оставался деревянным. Наиболее характерными цветами в декоре казахского жилища являлись белый, голубой, синий и зеленый. По аналогии с оформлением юрты, когда ее опоясывали узорчатые ленты, а полог, заменяющий дверь, украшали орнаментами и символами, в современном доме украшение входа остается актуальным. Входная дверь зачастую выполняется из дерева с декоративными накладными элементами в основном геометрического орнамента, в виде ромбов, кругов, крестов и др. Казахские усадьбы в отличие от русских, татарских и башкирских не огораживались глухим забором, а имели низкий забор решетчатого характера, выполненный из дерева, или наблюдалось полное его отсутствие со свободным расположением хозяйственных построек. Художественное и колористическое решение казахского жилища не претерпело серьезных трансформаций. Изменениям подверглись, как и в жилищах других народов, основные строительные материалы. Вместо дерева и самана в настоящее время применяется кирпич, а деревянный фронтон обшивают сайдингом [17].

К традиционным строительным материалам народов Российско-Казахстанского приграничья относят дерево, камыш, солому, саман, дерн и др. Срубы из дерева состояли в среднем из 12–15 бревен-венцов для домов русского и татарского народов, для башкирского из 9–11 бревен [10]. Их сооружали поставленными на дубовые стойки, бутовый камень или известняк с формированием подполья под передней половиной избы. Пазы сруба в таком случае прокладывались мхом или паклей, а снаружи промазывались глиной. В степной зоне исследуемого региона помимо срубной техники, для жилищного строительства применяли саманный метод. Стены избы выкладывали из кирпичей, изготовленных и высушенных в специальных формах из смеси глины, соломы и песка. Щели между кирпичами заливали жидкой

глиной. Также, саман применялся при каркасной технологии, где на деревянный каркас с заполнением промежутков соломой или песком и армированный обрешеткой, наносилась глиняная смесь. В последствии стены саманного дома оштукатуривались.

Саманные технологии применяются и в настоящее время в хозяйственно-бытовых сооружениях казахского населения. Среди сохранившихся домостроительных традиций населения Поволжья наблюдается применение камыша в качестве строительного материала. Подобно саманной технологии в современности возводятся «камышанки» – каркасные дома, где вместо соломы и песка применяются пучки камыша [11].

Как показали исследования, новое жилищное строительство этносов Российско-Казахстанского приграничья ведется преимущественно из кирпича – силикатного, глиняного или их комбинаций, а также газобетонных блоков. Для облицовки домов часто используется виниловый сайдинг, для покрытия кровли применяют асбестоцементный шифер, профилированный лист, металлическую черепицу и др. Ограждения и ворота выполняются из современных строительных материалов, таких как сетки, перфорированные металлические листы, пластик и др. В тоже время несмотря на достаточно широкое использование новых строительных и отделочных материалов наблюдается относительное постоянство применения цвета, формы декора в оформлении фасадов жилых домов и убранства в решении интерьерных пространств современных жилых домов этносов Российско-Казахстанского приграничья.

**Выводы.** Вследствие глобализации, которая повлияла на архитектуру застройки в сельской местности, происходит частичная потеря идентичности, сглаживание национальных особенностей в объемно-планировочном и архитектурно-художественном решении сельского жилища. Поиск самобытности и уникальности объектов материальной культуры, сохранение и возрождение национальных особенностей и традиционных приемов планировки поможет не только обогатить архитектуру сельского жилища, но и будет способствовать повышению туристского интереса и развитию этнокультурного туризма в рассматриваемом регионе и явиться активным ресурсом поддержания сельских территорий.

При формировании современных построек с применением прогрессивных методов строительства, инженерного обеспечения, строительных и отделочных материалов на селе, следует учитывать выявленные национальные особенности, как

в планировочной организации, так и в архитектурно-художественном оформлении интерьеров и фасадов зданий, влияющие на создание их образных характеристик, вытекающих из многовекового опыта и культурного наследия народов Российско-Казахстанского приграничья. Сочетание архитектуры новых компонентов учреждений этнокультурного туризма в сельской местности с существующими поселениями, в которых происходит знакомство туристов с культурой и бытом этноса, должно происходить через создание стилистического единства с сохраненным и возрожденным народным жилищем, имеющим ценное историко-архитектурное значение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Социология права. Словарь специальных терминов [Электронный ресурс]. URL: <https://1127.slovaronline.com/27-%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (дата обращения 20.12.2020).
2. Bancerova O.L., Kasimova A.R. Formation of ethno-cultural tourism clusters in Russia-Kazakhstan borderline territory // Journal of Environmental Management and Tourism. 2018. Vol. 9, Iss. 4(28). Pp. 771-776. doi: [https://doi.org/10.14505/jemt.v9.4\(28\).10](https://doi.org/10.14505/jemt.v9.4(28).10).
3. Яралов Ю.С. Национальное и интернациональное в советской архитектуре. М.: Стройиздат, 1985. 224 с.
4. Российско-Казахстанский транс-граничный регион: история, геоэкология и устойчивое развитие // под ред. А.А. Чибилева. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 216 с.
5. Ivitskaya S.V., Bancerova O.L., Kasimova A.R. Regional features of the formation of sustainable tourist buildings of the Russian-Kazakhstan border // Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering. 2020. Vol. 164. Pp. 11033. doi: 10.1051/e3sconf/202016411033.
6. Корнеева Ю.В. Архитектурные традиции народов Среднего Поволжья второй половины XIX века // Сборник материалов XXIII Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: теория, практика, инновации». Астрахань, 1 октября 2017 г. Астрахань: Научный центр «Олимп», 2017. С. 119–121.
7. Аитов Р.Р., Афанасьева Е.А., Токмакова Г.Ю. Принцип чередования цветов как характерная особенность архитектурных традиций казанских татар // Известия КазГАСУ. 2019. №4 (50). С. 7–17.
8. Банцерова О.Л., Касимова А.Р. Формирование типов этнического жилища в процессе создания культурно-исторической общности евразийских народов // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 5 (83). С. 29–33.
9. Дукомбаев А.Т. Типология оседлых памятников кочевников казахских степей // Материалы LIX Российской археолого-этнографической конференции студентов и молодых ученых. Благовещенск, 08-12 апреля 2019 г. Благовещенск: изд-во БГПУ, 2019. С. 207–209.
10. Многонациональный Самарский край [Электронный ресурс]. URL: <http://narod.samddn.ru/43-russkie/images/%D0%A0%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5/PeredUgol.jpg> (дата обращения 20.12.2020).
11. Домостроительные традиции нижеволжского населения Астраханской области [Электронный ресурс]. URL: <http://catalog.folc.ru/catalog/traditsionnaya-khozyaystvennaya-i-bytovaya-kultura/413.html> (дата обращения 20.12.2020).
12. Липинская В.А. Традиционная культура русского народа в средней полосе Европейской части страны: этнографический альбом. М.: Ин-т этнологии и антропологии им. Н. Н. Миклухо-Маклая, 2015. 320 с.
13. Жаренкова Е.С. Этническая специфика орнаментальной культуры народов Самарской области // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2012. № 7-2 (21). С. 59–52.
14. Мухаметшин Ю.Г., Халиков Н.А. Усадьба тюркских народов: сельское жилище татар Поволжья и Урала. Астана: Тюркская академия, 2011. 358 с.
15. Даминев И.И. Внешнее оформление и внутреннее обустройство жилища башкир во второй половине XX века // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Интеллектуальный потенциал XXI века». Казань, 29 января 2018 г. Уфа: изд-во «ОМЕГА САЙНС», 2018. С. 66–70.
16. Розенберг Н.В. Особенности полиэтнической культуры Поволжья в контексте культуры повседневности // Вестник ТГУ. 2012. №12. С. 390–395.
17. Сабитов А.Р. Архитектура жилища малых железнодорожных поселков в Западном Казахстане: дис. ... канд. арх.: 18.00.02 / А.Р. Сабитов. М., 1987. 197 с.
18. Абдалимова Ж.С. Национальный орнамент в прикладном искусстве Казахстана // Культурное наследие Сибири. 2017. № 4 (22). С. 96–100.
19. Бологова И.Ю., Козлова В.А. Русская изба как объект этнографического туризма [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29039202&pf=1&> (дата обращения 20.12.2020).

20. Аитов Р.Р., Афанасьева Е.А. Традиционная колористика татарского сельского жилого

дома в современных условиях // Известия КазГАСУ. 2016. №2 (36). С. 7–16.

*Информация об авторах*

**Банцера Ольга Леонидовна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры. E-mail: olga.bancerova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Садыкова Сара Шангереевна**, кандидат архитектуры, заведующий кафедрой архитектуры. E-mail: sadykova\_ssh@enu.kz. Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева. Казахстан, 010008, Нур-Султан, ул. Кажымукана, д. 13.

**Касимова Адема Рамазановна**, старший преподаватель кафедры архитектуры. E-mail: adema-23352@inbox.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 11.03.2021 г.

© Банцера О.Л., Садыкова С.Ш., Касимова А.Р., 2021

<sup>1</sup>*Bantserova O.L.*, <sup>2</sup>*Sadykova S.S.*, <sup>1,\*</sup>*Kasimova A.R.*

<sup>1</sup>*National research Moscow state University of civil engineering*

<sup>2</sup>*L.N. Gumilyov Eurasian national University*

*\*E-mail: adema-23352@inbox.ru*

## PROBLEMS OF REVIVAL OF NATIONAL FEATURES IN MODERN ARCHITECTURE OF RURAL DWELLING OF RUSSIAN-KAZAKH BORDERLAND

**Abstract.** *The article examines the problems of preserving and reviving historical and national traditions in the architecture of the rural dwelling of ethnic groups of the Russian-Kazakh border. The relevance of the study is due to the world processes of globalization, the growth of the population of cities and the gradual loss of unique objects of material culture in rural areas. The purpose of the study is to identify the space-planning, architectural and artistic features of rural dwellings of the Russian, Kazakh, Tatar and Bashkir peoples of the Russian-Kazakhstan borderland. The following methods were applied in scientific work: full-scale observations of existing buildings and structures on the studied territory, study of the natural climatic and landscape characteristics of the area, a comparative analysis of the established types of housing of ethnic groups. Within the framework of the study, architectural and artistic solutions of facades of traditional dwellings of different peoples, the peculiarities of the organization of interior spaces, their compositional and coloristic solution were considered and the relationship of historically established techniques with modern methods of building residential buildings of the rural population of the region was traced. As a result of the study, it was concluded that there is a partial loss of identity, smoothing out national features in the volumetric-planning and architectural-artistic solution of the dwelling of ethnic groups in the studied territory. At the same time, the preservation and revival of national features will help not only enrich the architecture of rural dwelling, but will also contribute to increasing tourist interest and the development of ethnocultural tourism in the Russian-Kazakh borderland.*

**Keywords:** *space-planning and architectural-artistic features, rural dwelling, hut, yurt, Russian-Kazakh borderland, ethnocultural tourism.*

### REFERENCES

1. Sociology of law. Dictionary of special terms [Sociologiyaprava. Slovar' special'nyh terminov] URL: <https://1127.slovaronline.com/27-%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (accessed 20.12.2020).(rus)

2. Bancerova O.L., Kasimova A.R. Formation of ethno-cultural tourism clusters in Russia-Kazakhstan borderline territory. Journal of Environmental

Management and Tourism. 2018. Vol. 9, Iss. 4(28). Pp. 771–776. doi:

[https://doi.org/10.14505//jemt.v9.4\(28\).10](https://doi.org/10.14505//jemt.v9.4(28).10).

3. Yaralov YU.S. National and international in Soviet architecture [Nacional'noeinternacional'noe v sovetskojarhitekture]. Moscow: Stroiizdat. 1985. 224 p. (rus)

4. Russian-Kazakhstan cross-border region: history, geocology and sustainable development [Rossijsko-Kazhastanskij transgranichnyj region: istoriya, geokologiya i ustojchivoe razvitie]. pod red.

A.A. CHibileva. Yekaterinburg: Ural'skoe otделение Rossijskoj akademii nauk, 2011. 216 p. (rus)

5. Ilvitskaya S.V., Banceroва O.L., Kasimova A.R. Regional features of the formation of sustainable tourist buildings of the Russian-Kazakhstan border. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 164. Pp. 11033. doi: 10.1051/e3sconf/202016411033.

6. Korneeva YU.V. Architectural traditions of the peoples of the Middle Volga region of the second half of the XIX century [Arhitekturnye tradicii narodov Srednego Povolzh'ya vtoroj poloviny XIX veka]. *Sbornik materialov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauka segodnya: teoriya, praktika, innovacii»*. Astrahan'. 2017. Pp. 119–121. (rus)

7. Aitov R.R., Afanas'eva E. A., Tokmakova G.YU. The principle of alternating colors as a characteristic feature of kazantatar's architectural traditions [Princip cheredovaniya cvetov kak karakternaya osobennost' arhitekturnyh tradicij kazanskih tatar]. *Izvestiya KazGASU*. 2019. No. 4 (50). Pp. 7–17. (rus)

8. Banceroва O.L., Kasimova A.R. Development of the ethnic dwelling types through the formation of cultural and historical community people of Eurasia [Formirovanie tipov etnicheskogo zhilishcha v processe sozdaniya kul'turno-istoricheskoy obshchnosti evrazijskih narodov]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018. No. 5 (83). Pp. 29–33. (rus)

9. Dukombaev A.T. Typology of sedentary monuments of nomads of the Kazakh steppes [Tipologiya osedlyh pamyatnikov kochevnikov kazahskih stepej]. *Materialy LIX Rossijskoj arheologo-etnograficheskoy konferencii studentov i molodyh uchenyh*. Blagoveshchensk. 2019. Pp. 207–209. (rus)

10. Multinational Samara Region [Mnogonacional'nyj Samarskij kraj] URL: <http://narod.samddn.ru/43-russkie/images/%D0%A0%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5/PeredUgol.jpg> (accessed 20.12.2020). (rus)

11. House-building traditions of the Lower Volga population of the Astrakhan region [Domostroitel'nye tradicii nizhnevolzhskogo naseleniya Astrahanskoj oblasti] URL: <http://catalog.folc.ru/catalog/traditsionnaya-khozyaystvennaya-i-bytovaya-kultura/413.html> (accessed 20.12.2020). (rus)

12. Lipinskaya V.A. Traditional culture of the Russian people in the middle zone of the European

part of the country: an ethnographic album [Tradicionnaya kul'tura russkogo naroda v srednej polose Evropejskoj chaste strany]. Moscow: In-t etnologii i antropologiiim. N. N. Mikluho-Maklaya, 2015. 320 p. (rus)

13. ZHarenkova E.S. Ethnic specifics of the ornamental culture of the peoples of the Samara region [Etnicheskaya specifika ornamental'noj kul'tury narodov Samarskoj oblasti]. *Istoricheskie, filosofskie politicheskie i yuridicheskie nauki, kul'turologiya i iskusstvovedenie. Voprosy teorii i praktiki*. 2012. No. 7-2 (21). Pp. 59–52. (rus)

14. Muhametshin YU.G., Halikov N.A. Manor of the Turkic peoples: rural dwelling of the Tatars of the Volga region and the Urals [Usad'ba tyurkskih narodov: sel'skoe zhilishche tatar Povolzh'ya i Urala]. Astana: Tyurkskaya akademiya, 2011. 358 p. (rus)

15. Daminev I.I. External design and internal arrangement of the Bashkir dwelling in the second half of the XX century [Vneshnee oformlenie i vnutrennee obustrojstvo zhilishcha Bashkir vo vtoroj polovine XX veka]. *Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Intellectual'nyj potencial XXI veka»*. Ufa. 2018. Pp. 66–70. (rus)

16. Rozenberg N. V. Features of the political culture of the Volga region in the context of the culture of everyday life [Osobennosti politicheskoy kul'tury Povolzh'ya v kontekste kul'tury povsednevnosti]. *Vestnik TGU*. 2012. No. 12. Pp. 390–395. (rus)

17. Sabitov A.R. Architecture of housing of small railway settlements in Western Kazakhstan [Arhitektura zhilishcha malyh zheleznodorozhnyh poselkov v Zapadnom Kazahstane]: dissertaciya kandidata arhitektury: 18.00.02. Moscow. 1987. 197 p. (rus)

18. Abdalimova ZH.S. National ornament in applied arts of Kazakhstan [Nacional'nyj ornament v prikladnom iskusstve Kazahstana]. *Kul'turnoe nasledie Sibiri*. 2017. No. 4 (22). Pp. 96–100. (rus)

19. Bologova I.YU., Kozlova V.A. Russian hut as an object of ethnographic tourism [Russkaya izba kak ob"ekt etnograficheskogo turizma] URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29039202&pf=1&> (accessed 20.12.2020). (rus)

20. Aitov R.R., Afanas'eva E.A. The traditional coloring of the Tatar rural houses in modern conditions [Tradicionnaya koloristika tatarskogo sel'skogo zhilogo doma v sovremennyh usloviyah]. *Izvestiya KazGASU*. 2016. No. 2 (36). Pp. 7–16. (rus)

#### Information about the authors

**Bantserova, Olga L.** PhD, Assistant professor. E-mail: [olga.banceroва@gmail.com](mailto:olga.banceroва@gmail.com). National research Moscow state University of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Sadykova, Sara S.** PhD. E-mail: sadykova\_ssh@enu.kz. L.N.Gumilyov Eurasian national University. Kazakhstan, 010008, Nursultan, Kazhymukan str., 13.

**Kasimova, Adema R.** Senior lecturer. E-mail: adema-23352@inbox.ru. National research Moscow state University of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

---

*Received 11.03.2021*

**Для цитирования:**

Банцеровва О.Л., Садыкова С.Ш., Касимова А.Р. Проблемы возрождения национальных особенностей в современной архитектуре сельского жилища Российско-Казахстанского приграничья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 53–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-53-65

**For citation:**

Bantserova O.L., Sadykova S.S., Kasimova A.R. Problems of revival of national features in modern architecture of rural dwelling of Russian-Kazakh borderlan. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 53–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-53-65

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-66-74

\* Золотарева М.В., Гранстрем М.А., Никитин Ю.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

\*E-mail: goldmile@yandex.ru

## К БИОГРАФИИ ГРАЖДАНСКОГО ИНЖЕНЕРА П.О. САЛЬМАНОВИЧА

**Аннотация.** Петр Онуфриевич Сальманович – закончил Училище гражданских инженеров в Санкт-Петербурге. В это время выпускники этого учебного заведения трудились во всех областях, относящихся к различным видам строительной деятельности. П.О. Сальманович является ярким представителем плеяды выпускников училища гражданских инженеров. Он внес значительный вклад в историю архитектуры и инженерного искусства, связанную с процессом развития железнодорожной отрасли во второй половине XIX в., на основе внедрения передовых технологий и инженерных решений. Наряду с практикой П.О. Сальманович вел активную преподавательскую деятельность в различных высших учебных заведениях по подготовке специалистов архитектурной и инженерной специальностей. Не будет преувеличением сказать, что П.О. Сальманович стоял у истоков развития российской инженерно-строительной науки, подъем которой пришлось на вторую половину XIX века. Поражает его научное наследие – учебники и лекционные курсы по актуальным вопросам теории и практики строительной деятельности. Еще одним направлением деятельности П.О. Сальмановича являлась общественная деятельность, связанная с вопросами совершенствования строительного законодательства, действующих норм и правил в области проектирования и строительства зданий и сооружений.

До настоящего времени творческое наследие П.О. Сальмановича является недостаточно изученным и не получило должной оценки. Данная статья позволяет яснее представить индивидуальность, сферу научных и практических интересов этого талантливого архитектора, инженера, преподавателя, пропагандиста всего передового в области строительной практики, и городского благоустройства,

**Ключевые слова:** история русской архитектуры, железнодорожное строительство, теория и практика строительной деятельности, архитектурные школы.

**Введение.** Творческая биография П.О. Сальмановича свидетельствует о его значительном вкладе в развитие теоретической инженерной мысли и практической деятельности в сфере строительства и архитектуры второй половины XIX в.

Актуальность исследования связана непосредственно с характером практической и теоретической деятельностью П. О. Сальмановича. Это дает возможность через призму архитектурно-строительной практики и научного метода одного человека посмотреть на историю архитектуры, инженерного искусства, развитие российской архитектурной школы, формирование строительного законодательства во второй половины XIX в.

С другой стороны, данное исследование является попыткой, хоть и кратко (в масштабах данной статьи) восстановить сведения о работах инженера-архитектора П.О. Сальмановича, поскольку специальных архитектурно-исторических исследований до настоящего времени проведено не было.

**Материалы и методы.** Методика исследования основана на комплексном подходе, включающем обобщение архивных, иконографических источников, изучение библиографических историко-архитектурных и градостроительных

материалов по изучаемой теме, выполнение натурных обследований. Таким образом, данная методика демонстрирует элементы аналитико-теоретического и системно-структурного анализа.

Кроме этого, изучение творческого наследия П.О. Сальмановича дает возможность через архитектурно-историческое осмысление проблематики, практической деятельности и теоретической мысли представить общую картину истории русской архитектуры второй половины XIX в.

**Основная часть.** П.О. Сальманович родился в 1833 г., получил домашнее образование и в 1848 г. поступил в Строительное Училище. В 1853 г. он окончил обучение, с присвоением звания архитекторского помощника. Его имя как лучшего выпускника было занесено на мраморную доску [1].

Сразу после окончания училища Сальманович поступил на работу в созданное годом ранее Управление СПб-Варшавской железной дороги. Он начал свою служебную деятельность делопроизводителем работ при постройке первого станционного здания, работая под началом главного архитектора дороги К.А. Скаржинского (автора первого вокзала). Первоначально железнодорожный путь был проложен до царской резиденции в Гатчине.

СПб-Варшавская железная дорога имела большое экономическое значение. Она должна была соседить центральные районы Российской Империи с европейскими странами. Поэтому строили ее достаточно быстрыми темпами. Если в 1851 г. было открыто движение на СПб-Московском участке, то к 1856 г. эта дорога практически дошла от Варшавы до австрийской границы.

Тогда же стало понятно, что здание первого вокзала, построенное по проекту К.А.Скаржинского, перестало удовлетворять, как современным требованиям железнодорожного хозяйства и подвижного состава, так и все возрастающему потоку пассажиров этого направления. Новое здание должно было решить технические и функциональные задачи, в соответствии с европейскими аналогами железнодорожных вокзалов. Первоначально даже было предложено перейти на европейскую калию железнодорожного полотна. Однако это решение было отклонено П. П. Мельниковым, будущим министром путей сообщения, а в то время, инспектором и членом Комитета железных дорог [2].

Итоги Крымской войны отразились на дальнейших мероприятиях железнодорожного строительства, которые стало невозможно финансировать из казны. Поэтому император Александр II одобрил продажу права на завершение строительства железной дороги и реконструкцию вокзала созданному специально для этого Главному Обществу Российских железных дорог под управлением директора Пауре. А в 1857 г. П.О.

Салмонович был назначен на должность архитектора при этом Обществе [3].

Для решения технических задач к проекту был привлечены инженеры русский А. С. Мерецкой и француз Ю. Фляш. Вокзал представлял собой сложное инженерное сооружение по техническому и конструктивному решению. Путевое хозяйство, включало в себя пять поворотных кругов, располагалось в непосредственной близости к платформам. Пять платформ могли одновременно обслуживать десять поездов, как пригородного направления, так и дальнего следования. Пространство дебаркадера было перекрыто треугольными фермами, поддерживающими остекленную крышу. Под остекленным дебаркадером находилось три платформы. Инженерным задачам было подчинено и архитектурное решение здания вокзала. Сооружение состояло из трех корпусов, соединенных между собой (рис. 1)

При проектировании главного корпуса, выходящего на Обводный канал кроме архитектурной, была решена и градостроительная задача. Он замыкал собой Измайловский проспект, а его башня стала визуальной доминантой, прилегающей территории. Два перпендикулярные к главному, административному зданию корпуса обслуживали пассажиров, прибывающих на вокзал и отправляющихся в путь, они были разделены платформами. Поскольку не было еще нормативов по составу и площадям помещений, обслуживающих пассажиров (они будут выпущены только в конце XIX в.), набор помещений вокзала был минимальным [4].

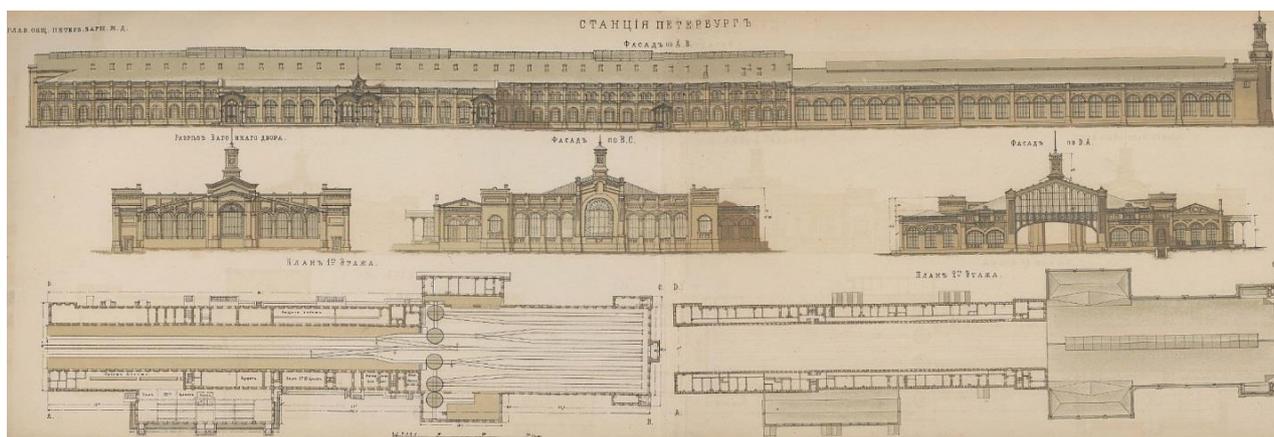


Рис. 1 Пассажирское здание СПб-Варшавской железной дороги в Санкт-Петербурге  
[Источник: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Варшавский\\_вокзал\\_\(Санкт-Петербург\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Варшавский_вокзал_(Санкт-Петербург))]

Архитектурное решение главного фасада достаточно оригинально и не имеет аналогов ни в каком стилистическом направлении. Строго симметричное центральное здание вокзала по силуэту могло напоминать ранее построенный К.А.

Тоном здание Николаевского вокзала [5]. Небольшая башня с часами венчала центральную часть сооружения. Некоторую легкость зданию придавали большие арочные окна и центральный витраж (рис. 2).



Рис. 2. Пассажирское здание СПб-Варшавской железной дороги в Санкт-Петербурге. Вид с Вознесенского проспекта. [Источник: <https://pastvu.com/p/503866>]

В структуре вокзального комплекса по проекту П.О. Сальмоновича были построены пакгауз на товарной станции, жилые дома для служащих (наб. Обводного канала, 118), каменные бани [6]. Также 1874 г. была запроектирована сборная паровозная мастерская, которая должна была быть оснащена несгораемой крышей. Однако проект не получил одобрения, скорее всего вследствие экономических соображений. Тем более ценным является материал, опубликованный в журнале «Зодчий», где подробно описывается этот проект, даются его чертежи, приводятся расчеты конструкций и спецификация материалов. Следует отметить, что эта статья под названием «Общие конструкции мастерских при железных дорогах» [7] появилась в 1870 г. после командировки П.О.Сальмоновича за границу «с ученой целью» для знакомства с технологиями строительства вспомогательных помещений железно-

дорожных станций. В Управлении СПб-Варшавской железной дороги П.О. Сальмонович прослужил 41 год, с 1853 по 1894 гг. Являясь главным архитектором, а затем начальником технического стола и исполнителем проектов и смет по «более важным работам» на направлении Санкт-Петербург – Варшава, П.О. Сальмонович участвовал в проектировании и строительстве станционных и других зданий и сооружений на этой железной дороге [8]. Следует отметить, что все железнодорожные сооружения архитектором были решены в едином стиле, в независимости от характера станций. Размеры зданий и состав их помещений зависели от величины и статуса населенного пункта, через который проходил железнодорожный путь, а также была ли эта станция узловым. В любом случае железная дорога давала дополнительные возможности для развития городов, через которые она была проведена.



Рис. 3. Пассажирское здание Санкт-Петербургско-Варшавской железной дороги в Белостоке [Источник: [http://www.gpedia.com/en/gpedia/Transport\\_in\\_Bialystok](http://www.gpedia.com/en/gpedia/Transport_in_Bialystok)]

Полное открытие магистрали состоялось 15 декабря 1862 г. Она прошла через такие большие города, как Луга, Псков, Динабург, Вильно, Белосток (рис. 3). К моменту строительства дороги единственной узловой станцией являлся Динабург (рис. 4), от которого с 1861 г. отходила ветка Риго-Динабургской железной дороги. Это значение города было подчеркнуто величиной здания вокзала и более разнообразным набором его помещений. Поскольку станция должна была объединить две линии, железнодорожный вокзал



Рис. 4. Пассажирское здание Санкт-Петербургско-Варшавской железной дороги в Динабурге  
[Источник: <https://www.grani.lv/daugavpils/90768-vokzal-kotorogo-net.html>]

Обслуживание магистрали Петербург-Варшава требовало наличие подготовленных железнодорожных рабочих и служащих. Поэтому в Вильно было учреждено железнодорожное училище, здание которого также спроектировал и построил П.О. Сальманович.

Наряду с выполнением работ на Санкт-Петербургской Варшавской железной дороге Сальмановичем были построены амбары товарных складов Северного страхового общества с подводом путей от Николаевской железной дороги. А при участии в конкурсе на строительство зданий ранка на Сенной площади Сальманович получил вторую премию.

Кроме активной проектной деятельности, необходимо отметить деятельность П.О. Сальмановича в качестве ученого и преподавателя. В 1860 г. он был лично приглашен Министром Путей сообщения К.В. Чевкиным занять кафедру архитектуры в Институте Путей сообщения. Также он преподавал в Строительном Училище и Институте горных инженеров.

1870-е годы являются знаковыми для Строительного Училища. Возрастает его значение в качестве высшей школы, выпускающей кадры для

имел островное положение. В своей статье в журнале «Зодчий» «Пассажирская станция в Динабурге» [9] П.О. Сальманович писал о достаточно сложном выборе места для размещения вокзала, который был построен вдали от города, что потребовало дополнительных помещений – номеров для отдыха пассажиров, делающих пересадки. Кроме пассажирского здания были спроектированы и построены газовый завод, жилые дома, службы и пути при почтовой станции (рис. 4).

строительно-архитектурной отрасли. Практическая, а затем и преподавательская деятельность П.О. Сальмановича пришлась на время перестройки высших учебных заведений строительного и технического профиля во второй половине XIX в. [10] В 1865 г. произошло преобразование органов, которые курировали строительную отрасль в государстве. Эти преобразования затронули и систему подготовки кадров инженеров и архитекторов. С 1870-х гг. идет рост значения специалистов в области строительной практики, способных решать задачи нового технического уровня, которые встают перед инженерами и архитекторами в это время [11]. Поэтому современность требовала постоянного совершенствования учебных программ, введения необходимых инженерно-технических дисциплин, пополнения научно-исследовательской базы Училища новейшими разработками [12, 13]. Сальманович стал преподавателем, подготовившим лекционные курсы по новым дисциплинам: сопротивление материалов, расчетах конструкций и другие. Для студентов Сальмановичем был переведен курс аналитической геометрии, дифференциального и интегрального исчисления профессора Беланже с

дополнением расчетов устойчивости сводов. Для профессионального сообщества эти дополнения были напечатаны в 1876 г. в статьях журнала «Зодчий»: «Данные служащие к облегчению проектирования сводов» и «Данные, облегчающие проектирование сводов» [13, 14].

В качестве значительного научно-прикладного труда Сальмоновича, современники отмечали «Руководство к составлению смет и технической отчетности», впервые вышедшее в 1860 г., а в 1893 г. переработанное и переизданное с изменениями и дополнениями. Сборник содержал сведения для правильного составления смет и отчетности, он включал в себя формулы и таблицы для расчетов; свойства материалов, их цены; описание рабочей силы, расценки работ по урочному положению с выводом цен для Петербурга и Москвы [15]. Этот труд был настольной книгой не только у техников различных учреждений и проектировщиков, но и у домовладельцев.

Еще одним трудом Сальмоновича–ученого является «Прикладная термодинамика», в котором приводятся результаты исследования теплосохраняемости построек. В нем рассматривались вопросы, касающиеся расчетов толщины стен в зависимости от климатических условий. Это исследование, а также статьи «Фундаменты и основания» вошли в серию юбилейных изданий Института гражданских инженеров 1892 г.

В 1877 г. П. О. Сальмонович был назначен преподавателем по специальному законоведению, а в 1883 г. был издан «Курс специального законоведения» - конспект лекций, который читался автором в Институте гражданских инженеров. В состав этого курса вошли темы, связанные с управлением архитектурой и строительством на государственном уровне и на местах; вопросы регулирования, регламентации и нормирования проектной и строительной деятельности; правила составления сметной и отчетной документации и другие [16].

П.О. Сальмонович являлся автором многочисленных статей в журналах «Зодчий», «Неделя строителя», «Искусство и художественная промышленность» и других. Изучение материалов, представленных в ведущих профессиональных изданиях, в которых печатался П.О. Сальмонович позволяет выявить круг вопросов, вызывавших наибольший интерес у современников. В статьях 1870-х - начале 1880-х гг., представлены темы применения новых конструкций, их рационального использования. В публикациях 1880-х-1890-х, гг. большое значение приобретают проблемы совершенствования строительного законодательства в государстве и особенно, касаясь Санкт-Петербурга. Это было связано с разработкой в это время новых городских положений.

Поэтому в своих статьях автор рассматривает проблематику пожарной безопасности, санитарной гигиены крупных городов, их благоустройства.

Значительна роль П.О. Сальмоновича в разработке вопросов юридических оснований архитектурной практики: внесение изменений и дополнений в действующие документы правового характера по вопросам архитектурно-строительной деятельности; упрощение способов составления смет на строительные работы; совершенствование технического и полицейского надзора за постройками; повышение ответственности техников, десятников и подрядчиков за производство строительных работ и другие.

В работе «По поводу предполагаемых изменений в ныне действующем обязательном постановлении по строительной части Санкт-Петербурга» [16, 17] напечатанной в «Неделе строителя», были подробно рассмотрены и проанализированы статьи проекта этого документа. Во вступлении статьи П.О. Сальмонович писал: «Очевидно, что эти постановления, по смыслу городского положения будут иметь значение только для Санкт-Петербурга, но с другой стороны несомненно, что эти правила послужат прототипом для издания подобных постановлений в других городах России ... обязательный постановления для Санкт-Петербурга затрагивают многие стороны нашей строительной действительности имеют не только местное, но и общее значение» [16].

Рассмотрим некоторые замечания, сделанные П.О. Сальмоновичем по поводу статей обязательного постановления. Поскольку автор занимался вопросами теплопроводности зданий, то одно из замечаний касалось нормирования толщины стен в жилых постройках. По этому поводу автор писал: «строительная практика обладает средствами при рациональном устройстве и надлежащем отоплении достигнуть теплосохраняемости строений при толщине кирпичных стен в 12 вершков (0,5 м)». Справедливым является замечание автора статьи по поводу требования использования тех или иных цветов для окрашивания фасадов зданий. «Строительные положения, – писал П.О.Сальмонович, отнюдь не должны вторгаться в область вкуса и искусства и если ограничивать свободу выбора цветов для окраски фасадов, то отсюда один шаг до предписания какие стили должны быть избираемы для внешней отделки». Более важным в этом случае, по мнению автора, является состав красок, их гигиенические характеристики. Являясь практиком, П.О. Сальмонович в статье подробно рассматривает вопросы пожарной безопасности, давая профессиональные советы для уточнения и

изменения устаревших положений проекта обязательных постановлений. Также, Сальмонович обращает внимание на необходимость решения вопросов устройства помойных ям, отхожих мест, общего гигиенического состояния жилого фонда. По поводу всех замечаний автором даются конкретные предложения решения этих проблем.

Озабоченность состоянием управления технической частью в городах нашла отражение в тексте статей в «Неделе строителя» – «Об организации строительной части в городах» [18, 19], опубликованных в двух номерах издания. П. О. Сальмонович писал, что развитие и усложнение городского и земского хозяйства по технико-строительной части требует привлечение квалифицированных, желательнее с высшим образованием, специалистов – техников для службы в городе и земства. Однако в соответствии с законодательством того времени служебное положение техников в этих структурах не приравнивалось к государственным служащим, т.е. они не могли рассчитывать на государственное пенсионное обеспечение в будущем. Также при смене городского или земского начальства, а оно было выборным, техники могли получить отставку от новой местной администрации. Не совсем были ясны и должностные обязанности этих специалистов. Поэтому складывалось «мнение, что служба в городах и земствах при управе непрочна: что она подвержена влиянию различных случайностей и находится в зависимости от личных переменных взглядов администрации». Следует отметить, что этот вопрос неоднократно поднимался на съездах зодчих. П.О.Сальмонович в своей статье дает конкретные предложения: «установление известных определенных норм для окладов; издание обстоятельно составленных инструкций, в которых были бы определены как круг обязанностей техника, так и гарантировано его положение по отношению к переменным членам управления; исходатайствование прав государственной службы, хотя бы на условиях зачитывания двух лет службы за один год». Далее автор подробно рассматривает положительный опыт Херсонской губернии, где существует подробная инструкция для служащих в земствах по дорожно-строительному делу.

В 1898 году, незадолго до кончины П.О. Сальмонович был награжден орденом святого Станислава I степени. Скончался П.О. Сальмонович 9 июня 1898 г. В некрологе, опубликованном в издании «Строитель», наряду с его профессиональными заслугами отмечалось: «В общественной и служебной жизни П.О. Сальмонович пользовался уважением и любовью не только товарищей, но и подчиненных; его приветливое

обращение и всесторонние в строительном искусстве познания были доступны для каждого лица, обращающегося к нему за разъяснениями или за советом трудных и сложных технических вопросов» [20].

### Выводы

Творческая биография О.П. Сальмановича свидетельствует о его значительном вкладе в историю русской архитектуры, инженерного искусства, науки и высшей архитектурной школы. Об этом свидетельствуют направления его деятельности.

1. Вторая половина XIX в. явилось временем повсеместного развития железнодорожного транспорта, дающего возможность связать между собой обширные территории. Одним из важнейших направлений явилось западное направление. СПб-Варшавская железная дорога должна была связать центр России с европейскими территориями. Строительство этого пути стало основой практической деятельности О.П. Сальмановича. Зодчим были запроектированы не только станционные здания по пути следования дороги, но и сложнейшие в технологическом плане объекты обслуживания железной дороги.

2. О.П. Сальманович начал свою деятельность, как преподаватель высших строительных и технических учебных заведений в период активного развития новейших направлений в технико-технологических и строительных науках. Его опыт практической деятельности позволил создать ряд научных и научно-прикладных трудов в области строительных конструкций, их расчета, термодинамики, составления смет и отчетности в процессе подготовки и ведения строительства, нормирования и законодательных основ строительной деятельности.

3. Общественная деятельность Сальмановича связана с вопросами совершенствования технико-строительного и архитектурного законодательства. По этим вопросам он неоднократно публиковал статьи на страницах в профессиональной пародической печати, выступал на профессиональных собраниях и съездах зодчих.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барановский В.Г. Юбилейный справочник, содержащий сведения о деятельности бывших воспитанниках Института гражданских инженеров. 1841–1892. СПб., 1892. 400 с.
2. Zolotareva M.V. Typology of Passenger Railway Stations in the Late 19th – Early 20th Centuries (Russian Experience) *Advances in Intelligent Systems and Computing* (2000) *TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. Pp 345–353 [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3\\_34](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3_34)

3. Золотарева М.В. Выпускник строительного училища Петр Сальманович // Архитектурный Альманах. Вып. 2. СПбГАСУ. СПб., 2017. С. 22–33.
4. Золотарева М.В. Вопросы архитектурной практики и права второй половины XIX века (к творческой биографии П.О. Сальмановича) // Докл. 67-й научн. конф. преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. II. СПбГАСУ. СПб., 2004. С. 64–65.
5. Заварихин С.П. Архитектурные сюжеты. СПб.: Изд-во НП-Принт, 2012. 447 с.
6. Гинзбург А.М., Кириков Б.М. Архитекторы и строители Санкт-Петербурга середины XIX – начала XX века. СПб.: Изд-во Пилигрим, 1996. 395 с.
7. Сальмонович П.О. Общая конструкция мастерских при железной дороге // Зодчий. 1874. Вып. 11. С. 136–138.
8. Сальмонович П.О. Санкт-Петербургская Варшавская железная дорога. Вокзал в Санкт-Петербурге // Архитектурный вестник. № 1, 1860. С. 56–59.
9. Сальмонович П.О. Пассажирская станция в Динабурге // Зодчий. 1879. Вып. 3. С. 41–42.
10. Заварихин С.П. Юбилейная книга СПбГАСУ. СПб.: Изд-во Арт-Принт, 2002. 382 с.
11. Никитин Ю.А. Транспортные павильоны на всероссийских выставках // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 3. С. 53–55.
12. Заварихин С.П. Первый строительный вуз России // Зодчий. 2012. № 2. С. 10–14.
13. Сальманович П.О. Данные служащие к облегчению проектирования сводов. I ч. // Зодчий. 1876. Вып. 4. С. 47–49.
14. Сальманович П.О. Данные служащие к облегчению проектирования сводов. II ч. // Зодчий. 1876. Вып. 6. С. 67–69.
15. Заварихин С.П. Институт гражданских инженеров // Три века. Энциклопедия. Кн. 2. СПб., 2004. 639 с.
16. Сальманович П.О. По поводу предполагаемых изменений в ныне действующем обязательном постановлении по строительной части Санкт-Петербурга // Неделя строителя. 1888. С. 37–39.
17. Семенцов С.В. Архитектура и инженерия ансамблей Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3 (32). С. 61–67.
18. Сальманович П.О. Об организации строительной части в городах // Неделя строителя. 1898. № 11. С. 60–62.
19. Сальманович П.О. Об организации строительной части в городах (продолжение) // Неделя строителя. 1898. № 21. С. 67–68.
20. Некролог. П.О. Сальмонович // Строитель. № 23, 1898. С. 930–933.
21. Семенцов С.В., Мангушев Р.А. Архитектура и инженерия ансамблей Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3 (32). С. 61–67.

#### Информация об авторах

**Золотарева Милена Владимировна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: goldmile@yandex.ru Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. 4.

**Никитин Юрий Анатольевич**, доктор архитектуры, профессор, профессор-консультант. E-mail: juri-nikitin@yandex.ru Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. 4.

**Гранстрем Мария Александровна**, кандидат архитектуры, доцент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: arch\_project@bk.ru Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул.

---

Поступила 03.04.2021 г.

© Золотарева М.В., Гранстрем М.А., Никитин Ю.А., 2021

**\*Zolotareva M.V., Granstrom M.A., Nikitin Yu.A.**  
*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*  
*\*E-mail: goldmile@yandex.ru*

## TO THE BIOGRAPHY OF THE CIVIL ENGINEER P.O. SALMANOVICH

---

**Abstract.** Peter Onufrievich Salmanovich graduated from the School of Civil Engineers in St. Petersburg. At this time, graduates of this educational institution worked in all areas related to various types of construction activities. Salmanovich is a prominent representative of the pleiades of graduates of the School of Civil Engineers. He made a significant contribution to the history of architecture and engineering related to the development of the railway industry in the second half of the XIX century, through the introduction of advanced

---

technologies and engineering solutions. Along with his practice, Salmanovich was active in teaching at various higher educational institutions for the training of specialists in architectural and engineering specialties. It is no exaggeration to say that Salmanovich stood at the origins of the development of Russian engineering and construction science, the rise of which occurred in the second half of the XIX century. His scientific heritage is striking – textbooks and lecture courses on topical issues of the theory and practice of construction activities. Another area of activity of Salmanovich was public activity related to the improvement of construction legislation, existing norms and rules in the field of design and construction of buildings and structures.

To date, the creative heritage of Salmanovich is insufficiently studied and has not received a proper assessment. This article allows to more clearly present the personality, the scope of scientific and practical interests of this talented architect, engineer, teacher, propagandist of all the best in the field of construction practice and urban improvement.

**Keywords:** history of Russian architecture, railway construction, theory and practice of construction activity, architectural schools.

## REFERENCES

1. Baranovsky V.G. Anniversary reference book containing information about the activities of former students of the Institute of Civil Engineers. 1841-1892. [Yubilejnyj spravochnik, sodержashchij svedeniya o deyatelnosti byvshih vospitannikah Instituta grazhdanskikh inzhenerov]. SPb., 1892. 400 p. (rus)
2. Zolotareva M.V. Typology of Passenger Railway Stations in the Late 19th – Early 20th Centuries (Russian Experience) Advances in Intelligent Systems and Computing (2000) TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Pp 345–353. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3\\_34](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-37919-3_34)
3. Zolotareva M.V. Vypuschnik stroitel'nogo uchilishcha Petr Sal'manovich [Vypuschnik stroitel'nogo uchilishcha Petr Sal'manovich] Architectural Almanac. Vol. 2. SPbGASU. SPb., 2017. Pp. 22–33. (rus)
4. Zolotareva M.V. Voprosy arhitekturnoj praktiki i prava vtoroj poloviny XIX veka (k tvorcheskoj biografii P.O.Sal'manovicha) [Voprosy arhitekturnoj praktiki i prava vtoroj poloviny XIX veka (k tvorcheskoj biografii P.O.Sal'manovicha)]. Report of the 67th scientific conference of teachers, researchers, engineers and graduate students of the university. Part II. SPbGASU. SPb., 2004. Pp. 64–65. (rus)
5. Zavarikhin S.P. Architectural subjects. [Arhitekturnye syuzhety]. SPb. 2012. 447 p. (rus)
6. Ginzburg A.M., Kirikov B.M. Architects and builders of St. Petersburg in the mid-19th - early 20th centuries. [Arhitektory i stroiteli Sankt-Peterburga serediny XIX – nachala XX veka] SPb. 1996. 395 p. (rus)
7. Sal'monovich P.O. Obshchaya konstrukciya masterskih pri zheleznoj doroge. [Obshchaya konstrukciya masterskih pri zheleznoj doroge]. Architect, Vol. 11, 1874. Pp. 136–138 (rus)
8. Sal'monovich P.O. St. Petersburg Warsaw Railway. Railway station in St. Petersburg [Sankt-Peterburgskaya Varshavskaya zheleznyaya doroga. Vokzal v Sankt-Peterburge]. Architectural bulletin. 1860. No. 1. Pp. 56–59 (rus)
9. Sal'monovich P.O. Passenger station in Dinaburg [Passazhirskaya stanciya v Dinaburg]. Architect. 1879. Vol. 3. Pp. 41–42 (rus)
10. Zavarikhin S.P. Anniversary book of SPbGASU [Yubilejnaya kniga SPbGASU]. SPb. 2002. 382 p. (rus)
11. Nikitin Yu.A. Transport pavilions at all-Russian exhibitions [Transportnye pavil'ony na vserossijskikh vystavkah]. Industrial and civil construction. 2008. No. 3. Pp. 53–55. (rus)
12. Zavarikhin S.P. The first construction university in Russia [Pervyj stroitel'nyj vuz Rossii]. Architect. 2012. No. 2. Pp. 10–14. (rus)
13. Salmanovich P.O. These employees to facilitate the design of vaults. Part I [Dannye sluzhashchie k oblegcheniyu proektirovaniya svodov. I chasty]. Architect. 1876. No. 4. Pp. 47–49. (rus)
14. Salmanovich P.O. These employees to facilitate the design of vaults. Part II [Dannye sluzhashchie k oblegcheniyu proektirovaniya svodov. II chasty]. Architect. 1876. No. 6. Pp. 67–69. (rus)
15. Zavarikhin S.P. Institute of civil engineers [Institut grazhdanskikh inzhenerov]. Three centuries. Encyclopedia. Book. 2. SPb., 2004. 639 p. (rus)
16. Salmanovich P.O. Regarding the proposed changes in the current mandatory decree on the construction part of St. Petersburg [Po povodu predpolagayemykh izmenenij v nyne dejstvuyushchem obyazatel'nom postanovlenii po stroitel'noj chasti Sankt-Peterburga]. Week of the builder. 1888. Pp. 37–39. (rus)
17. Sementsov S.V. Architecture and engineering of ensembles of St. Petersburg [Arhitektura i inzheneriya ansamblej Sankt-Peterburga]. Bulletin of civil engineers. 2012. No. 3 (32). Pp. 61–67. (rus)
18. Salmanovich P.O. On the organization of the construction part in the cities [Ob organizacii stroitel'noj chasti v gorodah]. Week of the builder. 1898. No. 11. Pp. 60–62. (rus)
19. Salmanovich P.O. On the organization of

the construction part in cities (continued) [Ob organizacii stroitel'noj chasti v gorodah (prodolzhenie)]. Builder Week. 1898. No. 21. Pp. 67–68. (rus)

20. Obituary P.O. Salmonovich [Nekrolog. P. O. Sal'monovich]. Builder. 1898. No. 23. Pp. 930–933. (rus)

*Information about the authors*

**Zolotareva Milena V.**, Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of History and Theory of Architecture. E-mail: goldmile@yandex.ru St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St. 4.

**Nikitin Yuri A.**, Doctor of Architecture, Professor, Professor-Consultant of SPbGASU, juri-nikitin@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St. 4.

**Granstrom Maria A.**, Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of History and Theory of Architecture. E-mail: arch\_project@bk.ru St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya

---

*Received 03.04.2021*

**Для цитирования:**

Золотарева М.В., Гранстрем М.А., Никитин Ю.А. К биографии гражданского инженера П.О. Сальмановича // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 66–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-66-74

**For citation:**

Zolotareva M.V., Granstrom M.A., Nikitin Yu.A. To the biography of the civil engineer P.O. Salmanovich. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 66–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-66-74

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-75-81

Рахимбаев Ш.М., \*Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: dstt\_80@mail.ru

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРАТАЦИИ ТРЕХКАЛЬЦИЕВОГО СИЛИКАТА

**Аннотация.** Термодинамический анализ процессов гидратации трехкальциевого силиката  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  затруднен из-за ненадежности исходных данных для продуктов гидратации. К тому же имеются разногласия по поводу основности гидратных фаз ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  либо  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Для последнего в справочной литературе нет свободной энергии образования. Отсутствуют также данные по растворимости в воде этих гидросиликатов кальция.

Предложены величины  $\Delta G_{298}^0$  для этих гидросиликатов, равные 1064,3 и 639,7, а также энтальпии образования ( $\Delta H_{298}^0$ ), равные 1157,2 и 696,9 ккал/моль соответственно. Дальнейшие термодинамические расчеты выполнены с использованием этих величин. С целью расчета состава жидкой фазы использован упрощенный цикл Борна-Габера. Величины расчетного тепловыделения трехкальциевого силиката с образованием  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  и  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , полученные с использованием предложенных значений энтальпий, мало отличаются друг от друга и близки к экспериментальным данным. Расчетная растворимость  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  равна 0,7 г/л CaO, а  $\text{C}_2\text{SH}_2$  – 0,92 г/л CaO. Так как растворимость  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  намного ниже, чем у  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (портландита), который образуется при гидратации трехкальциевого силиката в большом количестве,  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  неустойчив в этих условиях и его основность повышается.

Высказано предположение, что  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  является основным продуктом гидратации ЦЕМ III и других цементов с высоким содержанием активных минеральных добавок, а  $\text{C}_2\text{SH}_2$  – ЦЕМ I и ЦЕМ II.

**Ключевые слова:** трехкальциевый силикат, гидросиликаты, термодинамика, энтальпия, энергия Гиббса, активность и концентрация ионов, удельное тепловыделение.

**Введение.** Алит –  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) – является важнейшим компонентом основного вяжущего современности – портландцемента. Алит на три четверти определяет его строительно-технологические свойства [1–8].

Исследованию свойств этого минерала посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных специалистов [9–13], однако некоторые вопросы его гидратации и гидратного фазообразования требуют дополнительного внимания [14–18]. Это относится, прежде всего, к составу гидросиликатов кальция, которые образуются при его взаимодействии с водой, а также к составу равновесной с ним жидкой фазы.

В.И. Бабушкин с сотрудниками отмечают, что термодинамический расчет реакций гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$  с образованием гидросиликатов кальция  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  и  $\text{C}_2\text{SH}_2$  затруднен из-за ненадежности термодинамических свойств последних [7].

До 60-х годов прошлого века считалось [1, 2], что при гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$  основным продуктом является двухосновный гидросиликат  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_2\text{SH}_2$ ).

Однако позднее утвердилось мнение, что гидратация алита и белита сопровождается образованием гидросиликата  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ) [3–7].

Однако не все согласны с этим мнением. Так, Л.Е. Коуплендом и Д.Л. Кантро [8] было показано, что основность гидросиликатов, образующихся из силикатов кальция  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$ , а также из портландцемента, зависит от водоцементного отношения: при увеличении В/Ц с 0,22 до 0,7–1 она падает от 2-х до 1,45.

В связи с этим следует подчеркнуть, что исследования последних лет по гидратации цемента проводились в суспензиях с В/Ц = 0,7–0,9, тогда как нормальная плотность алита и белита не превышает 0,2–0,25.

Лохер Ф.В. и Рихартц В. пришли к выводу, что основность продуктов гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  и портландцемента гораздо выше 1,5 и равна 2–3 [19].

Цель данной работы – восполнить указанные пробелы в термодинамике и химии процессов гидратации и гидратного фазообразования в системе  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ .

**Методы и материалы.** Термодинамические расчеты проводились с использованием стандартных справочных данных, приведенных в технической литературе, уточненных в ряде случаев авторами.

**Основная часть.** Прежде всего, протестируем численное значение  $\Delta G_{298}^0$  для  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  [7]

$$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} + 2\text{OH}^-; (1)$$

$$\Delta G_p^0 = 1053 - 3 \cdot 132,2 - 2 \cdot 283,5 - 2 \cdot 37,6 = 14,2 \text{ ккал/моль};$$

$$\lg K_p = -\Delta G_p^0 / 2,3RT = -10,41.$$

Теперь находим константу равновесия другим способом.

$$K_p = [3Ca^{2+}]^3 [2H_2SiO_4^{2-}]^2 [2OH^-]^2 = 432 [Ca^{2+}]^7;$$

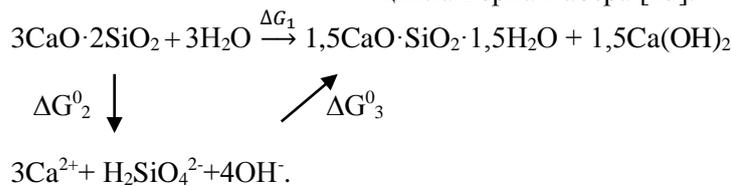
$$\lg K_p = 2,63 + 7 \lg [Ca^{2+}]; 7 \lg [Ca^{2+}] = -13,04;$$

$$[Ca^{2+}] = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ г-ион/л} = 0,77 \text{ г/л CaO};$$

$$3[Ca^{2+}] = 2,3 \text{ г/л CaO}.$$

Если учесть, что коэффициент активности ионов кальция не превышает в данном случае 0,5-0,6, расчетная активность ионов кальция в несколько раз выше, чем даже у портландита, что не соответствует действительности. Причина этого заключается в том, что величины изобарно-изотермических потенциалов  $C_3S_2H_3$  и  $H_2SiO_4^{2-}$  занижены, т. к.  $\Delta G_{298}^0$  для ионов кальция, гидроксидов и воды не вызывают сомнений [20-23].

На основе тщательного анализа соотношения численных значений энергии Гиббса для  $C_3S_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $C_2SH_{1,17}$  и других соединений [19-23] предлагаются следующие величины  $\Delta G_{298}^0$ : для  $C_3S_2H_3$  -1064,3, а для  $H_2SiO_4^{2-}$  - 285,5 ккал/моль или г-ион/л.



Здесь величина  $\Delta G_1^0$  равна изменению свободной энергии в результате гидратации  $C_3S$  с превращением его в смесь гидросиликата кальция и портландита;

$\Delta G_2^0$  - изменение  $\Delta G$  в результате растворения алита в воде;

$\Delta G_3^0$  - изменение свободной энергии в результате выпадения в твердую фазу смеси гидросиликата кальция и портландита.

Из направления стрелок следует, что  $\Delta G_1^0 = \Delta G_2^0 + \Delta G_3^0$ .

$$\text{Рассчитаем численные значения } \Delta G_1^0 - \Delta G_3^0.$$

$$\Delta G_1^0 = 665,5 + 3 \cdot 56,7 - 532,15 - 1,5 \cdot 214,4 = -18,15 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_2^0 = 665,5 + 3 \cdot 56,7 - 3 \cdot 132,2 - 285,5 - 4 \cdot 37,6 = 3,1 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_3^0 = 3 \cdot 132,2 + 285,5 + 4 \cdot 37,6 - 532,15 - 1,5 \cdot 214,4 = -21,25 \text{ ккал/моль}.$$

Рассчитаем ионный состав жидкой фазы вблизи частиц алита, а затем - находящейся в равновесии с гидросиликатом кальция.

$$\Delta G_2^0 = 3,1 \text{ ккал/моль}; K_p = -2,27;$$

$$K_p = [3Ca^{2+}]^3 [H_2SiO_4^{2-}] [4OH^-]^4 = 6912 [Ca^{2+}]^8;$$

$$\lg K_p = 3,84 + 8 \lg [Ca^{2+}]; \lg [Ca^{2+}] = -6,11; \lg [Ca^{2+}] = -0,76;$$

Протестируем эти величины на основе уравнения (1).

$$\Delta G_p^0 = 1064,3 - 3 \cdot 132,2 - 2 \cdot 285,5 - 2 \cdot 37,6 = 21,5 \text{ ккал/моль};$$

$$15,83 \lg K_p = -15,76 K_p = 2,63 + 7 \lg [Ca^{2+}];$$

$$\lg [Ca^{2+}] = -2,63; [Ca^{2+}] = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,117 \text{ г/л CaO};$$

$$3[Ca^{2+}] = 0,35 \text{ г/л CaO}.$$

Пересчитаем активность ионов  $a=[Ca^{2+}]$  на их концентрацию  $C$  по формуле  $a=C/\gamma$ , где  $\gamma$  - коэффициент активности ионов [24].

Для этого вначале рассчитаем ионную силу раствора  $f$  [24].

$$f = 0,5 (3 \cdot 2,09 \cdot 4 + 2 \cdot 2,09 \cdot 4 + 2 \cdot 2,09) \cdot 10^{-3} = 2,3 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma_{Ca^{2+}} = 0,53; C_{Ca^{2+}} = 0,66 \text{ г/л CaO};$$

$$\gamma_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,55; C_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,4 \text{ г/л SiO}_2;$$

$$\gamma_{OH^-} = 0,92; pH = 11,7.$$

Расчетная величина растворимости  $C_3S_2H_3$  согласуется с установленным экспериментально значением растворимости гидросиликата состава  $4CaO \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$ , равной 0,53 г/л CaO [7].

Теперь, используя предложенные величины  $\Delta G_{298}^0$  для  $H_2SiO_4^{2-}$  и  $C_3S_2H_3$  рассчитаем процесс гидратации алита с применением простейшего цикла Борна-Габера [25].

$$[Ca^{2+}] = 0,174 \text{ г-ион/л} = 9,74 \text{ г/л CaO}; 3[Ca^{2+}] = 29,2 \text{ г/л CaO}.$$

Такой показатель активности ионов  $Ca^{2+}$  реализуется лишь у самого поверхностного слоя частиц гидратирующегося алита (внутренний слой по Кондо), а в жидкой фазе содержание ионов резко падает из-за кристаллизации портландита и гидросиликатов Ca.

Рассчитаем состав жидкой фазы, находящейся в равновесии с гидросиликатом кальция + портландит.

$$-\Delta G_3^0 = 21,25 \text{ ккал/моль}; K_p = -15,58;$$

$$\lg [Ca^{2+}] = -2,43; [Ca^{2+}] = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,208 \text{ г/л CaO};$$

$$3[Ca^{2+}] = 0,62 \text{ г/л CaO}.$$

Пересчитаем величины активности ионов  $a=[Ca^{2+}]$ ,  $[H_2SiO_4^{2-}]$  и  $[OH^-]$  на концентрации  $C$  по формуле  $a=C/\gamma$ , где  $\gamma$  - коэффициент активности. Для этого сначала рассчитаем ионную силу  $f$ .

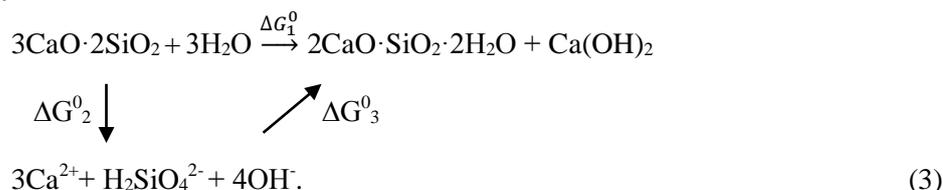
$$f = 0,5 (3,7 \cdot 3 \cdot 4 + 3,7 \cdot 4 + 3,7 \cdot 4) \cdot 10^{-3} = 3,7 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma_{Ca^{2+}} = 0,49; C_{Ca^{2+}} = 1,18 \text{ г/л CaO};$$

$$\gamma_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,49; C_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,42 \text{ г/л SiO}_2; \gamma_{OH^-} = 0,9; pH = 12,2.$$

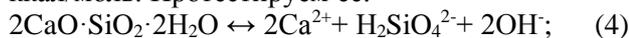
Полученные результаты удовлетворительно согласуются с тем, что растворимость портландита равна 1,13 г/л CaO [1].

Рассмотрим теперь гидратацию алита с образованием двухосновного гидросиликата  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_2\text{SH}_2$ ).



Расчет  $\Delta G_1^0$  и  $\Delta G_3^0$  невозможен при отсутствии величины свободной энергии  $\text{C}_2\text{SH}_2$ .

На основе анализа зависимости  $\Delta G_{298}^0$  гидросиликатов кальция от состава предлагаем величину свободной энергии  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , равную  $-639,7$  ккал/моль. Протестируем ее:



$$\Delta G_p^0 = 639,7 - 2 \cdot 132,2 - 285,5 - 2 \cdot 37,6 = 14,6 \text{ ккал/моль};$$

$$\lg K_p = -10,70; K_p = [2\text{Ca}^{2+}]^2 [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] [2\text{OH}^-]^2 = 16[\text{Ca}^{2+}]^5;$$

$$\lg K_p = 1,2 + 5\lg[\text{Ca}^{2+}]; \lg[\text{Ca}^{2+}] = -2,38;$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,23 \text{ г/л CaO};$$

$$2[\text{Ca}^{2+}] = 0,46 \text{ г/л CaO}.$$

Рассчитаем растворимость  $\text{C}_2\text{SH}_2$

$$f = 0,5(4,17 \cdot 4 \cdot 2 + 4,17 \cdot 4 + 4,17 \cdot 2) \cdot 10^{-3} = 2,9 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,524; C_{\text{Ca}^{2+}} = 0,89 \text{ г/л CaO};$$

$$C_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,5 \text{ г/л}; \text{pH} = 12,0.$$

Если учесть, что растворимость  $1,33\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  равна  $0,53$  г/л [7], а  $1,5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$  -  $0,7$  г/л, рассчитанное значение растворимости  $\text{C}_2\text{SH}_2$  вполне приемлемо.

Произведем по уравнению (3) расчет свободной энергии гидратации алита, используя предложенное значение энергии Гиббса  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , равное  $-639,7$  ккал/моль.

$$\Delta G_1^0 = 665,5 + 3 \cdot 56,7 - 639,7 - 214,4 = -18,5 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_2^0 = 665,5 + 3 \cdot 56,7 - 3 \cdot 132,2 - 285,5 - 4 \cdot 37,6 = 3,1 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_3^0 = 3 \cdot 132,2 + 285,5 + 4 \cdot 37,6 - 639,7 - 214,7 = -21,6 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_2^0 = 3,1; \lg K_{p2} = -2,27;$$

$$K_{p2} = [3\text{Ca}^{2+}]^3 [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] [4\text{OH}^-]^4 = 6912[\text{Ca}^{2+}]^8;$$

$$\lg K_{p2} = 3,84 + 8\lg[\text{Ca}^{2+}]; \lg[\text{Ca}^{2+}] = -0,76.$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 1,74 \cdot 0,1 = 0,174 \text{ г-ион/л} = 9,74 \text{ г/л CaO}.$$

Рассчитаем ионный состав жидкой фазы, находящейся в равновесии с продуктами гидратации алита.

$$-\Delta G_3^0 = 21,6; \lg K_{p3} = -15,93; \lg[\text{Ca}^{2+}] = -2,47;$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,193 \text{ г/л CaO};$$

$$3[\text{Ca}] = 0,58 \text{ г/л CaO};$$

$$f = 0,5(3,39 \cdot 4 + 3,39 \cdot 4 + 3,39 \cdot 4) \cdot 10^{-3} = 3,39 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,49; C_{\text{Ca}^{2+}} = 1,18; \gamma_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,49;$$

$$C_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,44 \text{ г/л SiO}_2;$$

$$\gamma_{\text{OH}^-} = 0,9; \text{pH} = 12,2.$$

Полученные результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными за исключением концентрации кремнекислоты в жидкой фазе [1]. Она на практике ниже расчетной величины из-за полимеризации иона  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ .

Теперь рассчитаем тепловыделение при полной гидратации алита по реакциям (2) и (3).

Анализ энтропийной составляющей энтальпии гидросиликатов кальция показал, что она зависит от содержания в молекуле ионов кислорода  $m\text{O}$  и от количества воды в ней  $n\text{H}_2\text{O}$  [26].

$$T \cdot S = 29,2 \cdot m + 61,1n \text{ кДж/моль}.$$

Для  $1,5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}$  получим:

$$T \cdot S = (3,5 \cdot 29,2 + 1,5 \cdot 61,1) / 4,18 = 46,4 \text{ ккал/моль}.$$

Отсюда  $\Delta H_{298}^0 = 532,15 + 46,4 = 578,6$  ккал/моль (для  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  она равна  $1157,2$  ккал/моль).

Теперь можно рассчитать тепловыделение алита (общее  $H$  и удельное  $h$ ).

$$H = 700,4 + 3 \cdot 68,3 - 578,6 - 1,5 \cdot 235,8 = -27,0 \text{ ккал/моль}.$$

$$h = H \cdot 1000 / 228 = 118,4 \text{ кал/г}.$$

Теперь посчитаем  $h$  для реакции гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  с образованием гидросиликата  $\text{C}_2\text{SH}_2$ .

$$\Delta H_{298}^0 = -639,7 - (4 \cdot 29,2 + 2 \cdot 61,1) / 4,18 = -696,9 \text{ ккал/моль};$$

$$H = 700,4 + 3 \cdot 68,3 - 696,9 - 235,8 = -27,4 \text{ ккал/моль};$$

$$h = 27,4 \cdot 1000 / 228 = -120,1 \text{ кал/г}.$$

Полученные результаты близки к экспериментальным данным [7].

**Выводы.** Приведенные в справочной литературе термодинамические свойства гидросиликата  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ , равные для энергии Гиббса  $-1052,95$  и  $-1143,2$  ккал/моль для энтальпии являются заниженными. Авторы предлагают величины  $-1064,3$  и  $-1157,2$  ккал/моль соответственно. Для гидросиликата  $\text{C}_2\text{SH}_2$  предлагаются  $\Delta G_{298}^0 = -639,7$  и  $\Delta H_{298}^0 = -696,9$  ккал/моль.

Растворимость  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  в воде равна  $0,7$  г/л  $\text{CaO}$ , а  $\text{C}_2\text{SH}_2$  -  $0,92$  г/л  $\text{CaO}$ .

При использовании приведенных выше величин свободной энергии Гиббса гидросиликатов кальция гидратация алита с образованием  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  и  $\text{C}_2\text{SH}_2$  сопровождается близкими термодинамическими эффектами.

Так как растворимость гидросиликата  $C_3S_2H_3$  значительно ниже, чем у портландита, он неустойчив в смеси с последним и превращается в  $C_2SH_2$ . Последний является основным продуктом гидратации алита и цементов типа ЦЕМ I и ЦЕМ II, а  $C_3S_2H_3$  – ЦЕМ IIIA при температуре 20–25 °С.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона. Перевод с английского. М: Стройиздат, 1961. 646 с.
2. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М: Высшая школа, 1980. 472 с.
3. Вовк А.И. Гидратация  $C_3S$  и структура CSH-фазы: новые подходы, гипотезы и данные // Цемент и его применение. 2012. №3. С. 89-92.
4. Тейлор Х.Ф. Химия цементов. М: Мир, 1996. 560 с.
5. Рамачандран В.С. Наука о бетоне. М: Стройиздат, 1986. 546 с.
6. Брунауэр С., Кантро Д.Л. Гидратация алита и белита при температуре 5–50 °С // Химия цемента. Перевод с английского под редакцией Х.Ф. Тейлора. М: Стройиздат, 1969. 502 с.
7. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П., Термодинамика силикатов. М: Стройиздат, 1986. 408 с.
8. Коупленд Л.Е., Кантро Д.Л. Гидратация портландцемента // Труды VI международного конгресса по химии цемента, том II, книга 1. М: Стройиздат, 1973. С. 222–241.
9. Шарафутдинов З.З., Кривобородов Ю.Р. Полимерцементные системы для строительства нефтяных и газовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. №3. С. 37-50.
10. Молчан Н.В., Кривобородов Ю.Р., Фертников В.И. Межатомные взаимодействия в бинарных соединениях кальция // Техника и технология силикатов. 2018. Т. 25. № 4. С. 106–109.
11. Сивков С.П. Цементы будущего. В сборнике: Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума и Международного Косыгинского Форума. 2019. С. 63–67.
12. Li X., Liu Z., Lv Y., Jiang W., Zhou Y., Cai L. Influence of graphene oxide on hydration characteristics of tricalcium silicate // Advances in Cement Research. 2019. Vol. 31. № 10. Pp. 448–456.
13. Claverie J., Bernard F., Kamali-Bernard S., Cordeiro J.M.M. Water's behaviour on ca-rich tricalcium silicate surfaces for various degrees of hydration: a molecular dynamics investigation // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2019. Vol. 132. Pp. 48–55.
14. Рахимбаев Ш.М., Аниканова Т.В., Рахимбаев И.Ш., Погромский А.С. Взаимосвязь между кинетическими константами твердения цемента и термодинамическими эффектами реакций // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 49 (75). С. 53–57.
15. Onoprienko N. N., Rahimbaev Sh. M. Influence of composition of functional additives and deformation modes on flow behavior of polymer composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Volume 327. 032043.
16. Елистраткин М.Ю., Минаков С.В., Шаталова С.В. Влияние минеральной добавки в составе композиционного вяжущего на эффективность работы пластификатора // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 2. С. 10-16.
17. Chen H., Li Q., Hou P., Cheng X., Feng P., Ye S. The influence of inorganic admixtures on early cement hydration from the point of view of thermodynamics // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 259. P. 119777.
18. Matsuzawa K., Sakai E., Shimazaki D., Kawakami H. Effect of non-adsorbed superplasticizer molecules on fluidity of cement paste at low water-powder ratio // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 97. Pp. 218–225.
19. Лохер В.Ф., Рихартц В. Исследование гидратации цемента // Труды VI международного конгресса по химии цемента, том II, книга 1. М: Стройиздат, 1973. С. 102–134.
20. Карпов И.К., Кашик С.А., Пампура В.Д. Константы веществ для термодинамических расчетов в геохимии и петрологии. Новосибирск: Наука, 1968. 432 с.
21. Наумов Г.В., Ходаковский И.Л., Рыженко В.И. Справочник термодинамических величин. М: Атомиздат, 1971. 238 с.
22. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М: Химия, 1968. 132 с.
23. Булах А.Г., Булах Н.Г. Физико-химические свойства минералов и гидротермальных растворов. Ленинград: Недра, 1978. 172 с.
24. Румянцев П.Ф., Хотимченко В.С., Никущенко В.М. Гидратация алюминатов кальция. Ленинград: Наука, 1974. 80 с.
25. Рахимбаев Ш.М. Расчет эффективных зарядов ионов в многоатомных кислородсодержащих соединениях по термохимическим данным // Журнал физической химии. 1966. Том 50. №12. С. 3080–3081.
26. Рахимбаев Ш.М., Рахимбаев И.Ш., Попеску Н.М. Верификация термодинамических свойств гидралоуминатов кальция и их фазовых

превращений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.  
2017. №11. С. 133–137.

*Информация об авторах*

**Рахимбаев Шарк Матрасулович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: i\_rahim@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Онопrienко Наталья Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: dstt\_80@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сальникова Ольга Николаевна**, кандидат философских наук, старший преподаватель кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: olsalnickowa@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 29.03.2021 г.

© Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н., 2021

**Rahimbaev Sh.M., \*Onoprienko N.N., Salnickowa O.N.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
\*E-mail: dstt\_80@mail.ru

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF TRICALCIUM SILICATE HYDRATION

**Abstract.** Thermodynamic analysis of the hydration processes of tricalcium silicate  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  is difficult due to the unreliability of the initial data for hydration products. In addition, there are disagreements about the basicity of the hydration phases ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  or  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). For the latter, there is no free energy of formation in the reference literature. There are also no data on the water solubility of these calcium hydrosilicates. The proposed values of  $\Delta G^0_{298}$  for these hydrosilicates, equal to 1064,3 and 639,7, as well as the enthalpies of formation ( $\Delta H^0_{298}$ ), equal to 1157,2 and 696,9 kcal/mol, respectively. Further thermodynamic calculations were performed using these values. To calculate the composition of the liquid phase, a simplified Born-Haber cycle is used. The values of the calculated heat release of tricalcium silicate with the formation of  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  and  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , obtained using the proposed values of enthalpies, differ little from each other and are close to the experimental data. The calculated solubility of  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  is 0,7 g/l CaO, and  $\text{C}_2\text{SH}_2$  is 0,92 g/l CaO. Since the solubility of  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  is much lower than of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite), which is formed during hydration of tricalcium silicate in large quantities,  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  is unstable under these conditions and its basicity increases. It is suggested that  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  is the main hydration product of CEM III and other cements with a high content of active mineral additives, and  $\text{C}_2\text{SH}_2$  is CEM I and CEM II.

**Keywords:** tricalcium silicate, hydrosilicates, thermodynamics, enthalpy, Gibbs free energy, ion activity and concentration, specific heat release.

### REFERENCES

- Li F.M. Chemistry of cement and concrete [Himiya cementa i betona]. Translated from English M: Stroyizdat, 1961. 646 p. (rus)
- Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials [Himicheskaya tekhnologiya vyazhushchih materialov]. M: High School, 1980. 472 p. (rus)
- Vovk A.I.  $\text{C}_3\text{S}$  hydration and CSH phase structure: new approaches, hypotheses, and data [Gidrataciya  $\text{C}_3\text{S}$  i struktura CSH-fazy: novye podhody, gipotezy i dannye]. Cement and its application. 2012. No. 3. Pp. 89–92. (rus)
- Taylor H.F. Chemistry of cements [Himiya cementov]. M: Mir, 1996. 560 p. (rus)
- Ramachandran V.S. Science of concrete [Nauka o betone]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 546 p. (rus)
- Brunauer S., Kantro D.L. Hydration of alite and belite at a temperature of 5–50 °C [Gidrataciya alita i belita pri temperature 5–50 °C]. Chemistry of cement. Translated from the English by H. F. Taylor. Moscow: Stroyizdat, 1969. 502 p. (rus)
- Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosyan O. P., Thermodynamics of silicates [Termodinamika silikatov]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 408 p. (rus)
- Copeland L.E., Kantro D. L. Hydration of p-cement [Gidrataciya portlandcementa]. Proceedings of the VI International Congress on Cement chemistry, volume II, book 1, Pp. 222–241. M: Stroyizdat, 1973. (rus)

9. Sharafutdinov Z.Z., Krivoborodov Yu.R. Polymer-cement systems for the construction of oil and gas wells [Polimercementnyye sistemy dlya stroitel'stva nefyanyh i gazovyh skvazhin]. Construction of oil and gas wells on land and at sea. 2017. No. 3. Pp. 37–50. (rus)
10. Molchan N.V., Krivoborodov Yu.R., Fertikov V.I. Interatomic interactions in binary calcium compounds [Mezhatomnye vzaimodejstviya v binarnykh soedineniyah kal'ciya]. Technique and technology of silicates. 2018. Vol. 25. No. 4. Pp. 106–109. (rus)
11. Sivkov S.P. Cements of the future [Cementy budushchego]. In the collection: Modern engineering problems of key industries. Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium and the International Kosygin Forum. 2019. Pp. 63–67. (rus)
12. Li X., Liu Z., Lv Y., Jiang W., Zhou Y., Cai L. Influence of graphene oxide on hydration characteristics of tricalcium silicate. *Advances in Cement Research*. 2019. Vol. 31. No. 10. Pp. 448–456.
13. Claverie J., Bernard F., Kamali-Bernard S., Cordeiro J.M.M. Water's behaviour on ca-rich tricalcium silicate surfaces for various degrees of hydration: a molecular dynamics investigation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019. Vol. 132. Pp. 48–55.
14. Rakhimbayev Sh.M., Anikanova T.V., Rakhimbayev I.Sh., Pogromsky A.S. The relationship between the kinetic constants of cement hardening and the thermodynamic effects of reactions [Vzaimosvyaz' mezhdru kineticheskimi konstantami tverdeniya cementa i termodinamicheskimi effektami reakcij]. Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2019. No. 49 (75). Pp. 53–57. (rus)
15. Onoprienko N. N., Rahimbaev Sh. M. Influence of composition of functional additives and deformation modes on flow behavior of polymer composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Volume 327. P.032043.
16. Elistratkin M.Yu., Minakov S.V., Shatalova S.V. Influence of a mineral additive in the composition of a composite binder on the efficiency of a plasticizer [Vliyanie mineral'noj dobavki v sostave kompozitsionnogo vyazhushchego na effektivnost' raboty plastifikatora]. *Construction materials and products*. 2019. Vol. 2. No. 2. Pp. 10–16. (rus)
17. Chen H., Li Q., Hou P., Cheng X., Feng P., Ye S. The influence of inorganic admixtures on early cement hydration from the point of view of thermodynamics. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 259. P. 119777.
18. Matsuzawa K., Sakai E., Shimazaki D., Kawakami H. Effect of non-adsorbed superplasticizer molecules on fluidity of cement paste at low water-powder ratio. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 97. Pp. 218–225.
19. Loher V.F., Richartz V. Research of cement hydration [Issledovanie gidratatsii cementa]. Proceedings of the VI International Congress on Cement Chemistry, volume II, book 1, M: Stroyizdat, 1973. Pp. 102–134. (rus)
20. Karpov I.K., Kashik S.A., Pampura V.D. Constants of substances for thermodynamic calculations in geochemistry and petrology [Konstanty veshchestv dlya termodinamicheskikh raschetov v geohimii i petrologii]. Novosibirsk: Nauka, 1968. 432 p. (rus)
21. Naumov G.V., Khodakovskiy I.L., Ryzhenko V.I. Handbook of thermodynamic quantities [Spravochnik termodinamicheskikh velichin]. Moscow: Atomizdat, 1971. 238 p. (rus)
22. Karapetyants M. H., Karapetyants M. L. Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances [Osnovnye termodinamicheskie konstanty neorganicheskikh i organicheskikh veshchestv]. M: Chemistry, 1968. 132 p. (rus)
23. Bulakh A.G., Bulakh N.G. Physico-chemical properties of minerals and hydrothermal solutions [Fiziko-himicheskie svoystva mineralov i gidrotermal'nykh rastvorov]. Leningrad: Nedra, 1978. 172 p. (rus)
24. Rummyantsev P.F., Khotimchenko V.S., Nikushchenko V.M. Hydration of calcium aluminates [Gidratatsiya alyuminatov kal'ciya]. Leningrad: Nauka, 1974. 80 p. (rus)
25. Rakhimbaev S.M. The calculation of the effective charges of the ions in a polyatomic oxygen-containing compounds on thermochemical data [Raschet effektivnykh zaryadov ionov v mnogoatomnykh kislorodsoderzhashchih soedineniyah po termodinamicheskim dannym]. *Journal of physical chemistry*. 1966, Vol 50. No. 12. Pp. 3080–3081. (rus)
26. Rakhimbaev S.M., Rakhimbayev I.S., Popescu N.M. Verification of the thermodynamic properties of hydroalumination calcium and phase transformations [Verifikatsiya termodinamicheskikh svoystv gidroalyuminatov kal'ciya i ih fazovykh prevrashchenij]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 11. Pp. 133–137. (rus)

*Information about the authors*

**Rahimbaev, Shark M.** DSc, professor. E-mail: i\_rahim@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Onoprienko, Natalya N.** PhD, Assistant professor. E-mail: [dstt\\_80@mail.ru](mailto:dstt_80@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Salnickowa, Olga N.** PhD, Senior lecturer. E-mail: [olsalnickowa@yandex.ru](mailto:olsalnickowa@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 29.03.2021*

**Для цитирования:**

Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н. Термодинамический анализ гидратации трехкальциевого силиката // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 75–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-75-81

**For citation:**

Rahimbaev Sh.M., Onoprienko N.N., Salnickowa O.N. Thermodynamic analysis of tricalcium silicate hydration. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 75–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-75-81

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90

**Фанина Е.А.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**E-mail: evgenia-@mail.ru*

## ЭФФЕКТИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА

**Аннотация.** *Выполнен комплекс экспериментальных исследований по определению акустических характеристик объемных панелей фиксированной толщины из композиционного материала на основе углерода, установленных в проеме между реверберационными камерами. Определены индексы звукоизоляции при их возбуждении диффузным звуковым полем в широких диапазонах частот.*

*Рассчитано время реверберации в модельных камерах с различной конфигурацией перегородок. Определена оптимальная конфигурация перегородки с пирамидальными ячейками для снижения времени реверберации в помещениях.*

*Использование графита в виде тонких плёнок, наносимых на различные поверхности, позволяет существенно снизить уровни звукового давления в помещении и повысить индексы звукоизоляции воздушного шума. Помимо тонких плёнок, графит можно использовать в качестве добавки в композиционных материалах звукоизоляционного назначения. Показано, что характеристики таких панелей имеют достаточно универсальный характер. Проведено сравнение измеренных акустических характеристик панелей из композиционного материала с аналогичными характеристиками традиционных материалов. Определили, что композиция относится к I группе огнезащитной эффективности и может быть рекомендована для использования в качестве огнезащитного материала.*

*Разработанный акустический материал является эффективным поглощающим средством, который решает задачи в архитектурной акустике, подавления эха в строительстве и архитектуре. Схожие с метаматериалами, природные и искусственные графиты позволяют решать эти задачи при небольших объемах и массах с применением простых не дорогостоящих технологий.*

**Ключевые слова:** *звукопоглощение, индекс звукоизоляции, композиционная панель, углеграфитовый материал.*

**Введение.** В конце 20-го века, в результате увеличения акустической нагрузки на техносферу и окружающую среду, значительно увеличился рост номенклатуры звукопоглощающих материалов и конструкций в различных областях науки и техники [1, 2]. Появились новые разделы акустики, например, автомобильная, авиационная акустика с определенными функциональными свойствами [3, 4]. Так, для автомобильных приоритетных характеристик являются небольшой удельный вес, негорючесть, низкая гигроскопичность, высокая способность материала к демпфированию.

Борьба с шумом на промышленных предприятиях и промплощадках является одной из насущных проблем в настоящее время, а создание эффективных акустических материалов и конструкций – одним из самых востребованных направлений современной промышленности. Многочисленными исследованиями доказано, что шум снижает производительность труда на промышленных предприятиях на 30 %, повышает опасность травматизма, приводит к развитию заболеваний. В структуре профессиональных заболеваний в РФ примерно 17 % приходится на заболевания органа слуха [5].

В дизайне архитектурных сред при создании комфортной среды применяют всевозможные

акустические панели и экраны. Важными их характеристиками являются долговечность, эксплуатационные свойства, возможность быстрого и удобного монтажа, а также внешний вид. Помимо шумозащитных свойств экраны служат преградой от распространения вредных химических веществ и частиц тяжелых металлов.

В 90-х годах началось исследование свойств новых акустических материалов – метаматериалов (АММ). Это искусственные материалы с ячейками малых волновых размеров. Их структура компактная, с множеством мелких деталей, искусственно созданной периодической структурой [6–16]. Акустические метаматериалы позволяют решать задачу синтеза оптимального поглотителя при минимальных массах и объемах, что значительно повышает звукопоглощающие характеристики конструкционных материалов.

На этапах проектирования акустических конструкций применяют элементы моделирования с использованием различного программного обеспечения [17, 18]. Большую роль в решении этой задачи сыграли работы В. Сэбина, С. Эйринга, В. Кнудсенса и др. [19, 20], в которых были созданы начала статистической теории акустики помещений, учитывающей поглощение стен и геометрические параметры, что привело к разработке новых поглощающих материалов и

звукопоглощающих конструкций с заданными параметрами.

Цель данной работы заключается в разработке эффективных акустических композиционных материалов с низкими массовыми и объемными удельными характеристиками.

**Материалы и методы.** В качестве звукопоглощающего материала использовали графит марки ГЛС-1, таблица 1. Гранулометрический состав графита (рис. 1) свидетельствует, что наиболее вероятный радиус частиц графита находится в интервале 36–130 мкм.

В качестве связующего для получения звукопоглощающего слоя рассматривалось жидкое

стекло – метасиликат натрия по ТУ 6-15-433-92 с модулем 3,36; массовой долей  $\text{Na}_2\text{O}$  – 7,04 % и  $\text{SiO}_2$  – 22,96 %; плотностью 1,29 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 1

**Физико-химические показатели графита**

Наименование показателя	ГЛС-1
Зольность, %, не более	13
Серы	–
Меди	1,0
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	1,2

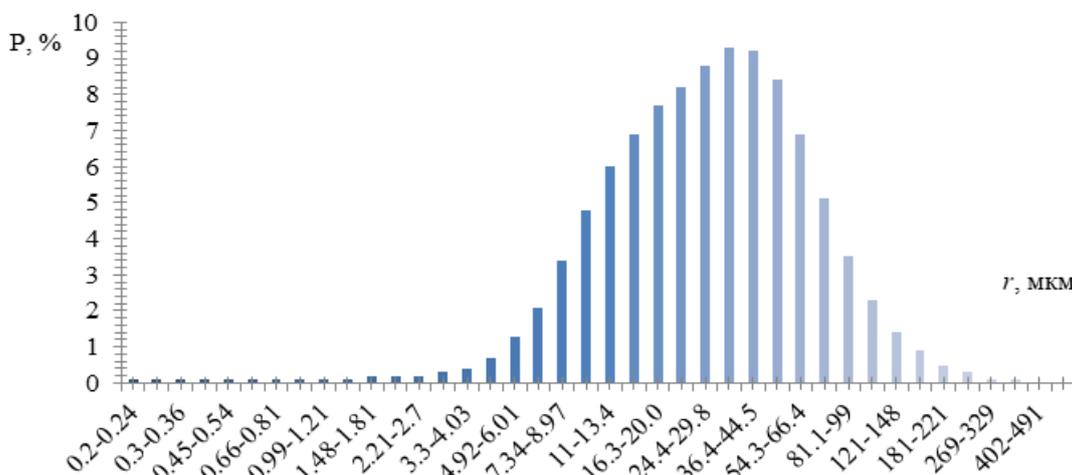


Рис. 1. Гранулометрический состав графита марки ГЛС-1

Для определения акустических характеристик определяли индекс звукоизоляции графитовой перегородки с помощью модельной камеры для определения звукоизолирующих характеристик.

Для измерения индекса звукоизоляции, а также уровня звукового давления сконструирована модельная камера для прохождения звуковых волн через различные виды перегородок.

В лабораторных условиях степень проникновения воздушного шума через исследуемую перегородку измеряют в смежных помещениях. В одном помещении устанавливают источник шума, в другом – микрофон. Перегородкой между помещениями служит исследуемая конструкция.

В модельной камере используется мощный широкополосный источник звука, конструктивно изолированный от стенок камеры и расположенный таким образом, чтобы звуковые волны направлялись непосредственно перпендикулярно к испытываемому образцу. Кроме того, камера разделена на две составные части во избежание прохождения звука по ее стенкам, искажая значение индекса звукоизоляции перегородки. Эти

особенности позволяют повысить чувствительность прибора и снизить погрешность при измерениях звукового давления.

В качестве источника звуковых волн используется цифровой генератор, соединенный с широкополосным динамиком. Приемником является система из предусилителя микрофонного ВПМ-101, капсуля микрофонного конденсаторного М-101 и измерителя шума и вибрации ВШВ-003-М 3, рис. 2.

Согласно СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» нормируемым параметром звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций жилых и общественных зданий, а также вспомогательных зданий производственных предприятий является индекс изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями  $R_w$ , дБ.

Индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ , дБ ограждающей конструкции с известной частотной характеристикой изоляции воздушного шума определяется путем сопоставления этой частотной характеристики с оценочной кривой, приведенной в табл. 2.

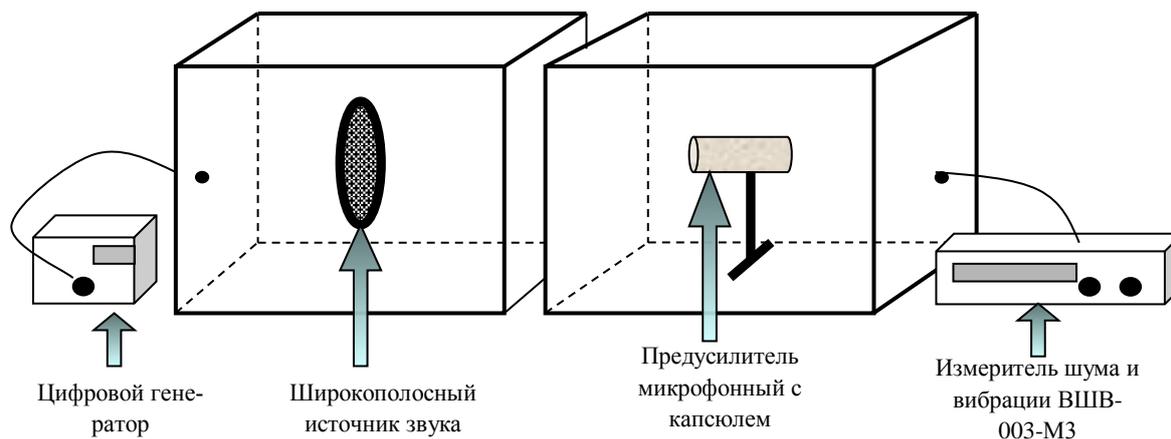


Рис. 2. Модельная камера для определения индекса звукоизоляции

Таблица 2

**Показатели индекса звукоизоляции на средних частотах третьоктавных полос, Гц**

Показатель	Средние частоты третьоктавных полос, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R <sub>w</sub> , дБ	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56

Для определения индекса изоляции воздушного шума R<sub>w</sub> необходимо определить сумму неблагоприятных отклонений данной частотной характеристики от оценочной кривой. Неблагоприятными считаются отклонения вниз от оценочной кривой. Если сумма неблагоприятных отклонений максимально приближается к 32 дБ, но не превышает эту величину, величина индекса R<sub>w</sub> составляет 52 дБ.

Если сумма неблагоприятных отклонений превышает 32 дБ, оценочная кривая смещается вниз на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала указанную величину. Если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, оценочная кривая смещается вверх (на целое число децибел) так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой максимально приближалась к 32 дБ, но не превышала эту величину.

За величину индекса R<sub>w</sub> принимается ордината смещенной (вверх или вниз) оценочной кривой в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц.

Моделирование акустической характеристики – времени реверберации осуществлялось в программной среде Ecotect Analysis. Если звуковые коэффициенты поглощения материалов в качестве модели были правильно определены, то время реверберации в диапазоне частот для любой зоны может быть определена программно.

**Основная часть.** В ходе ряда научных опытов установлено, что для обеспечения достаточной звукоизоляции жилых и производственных

помещений можно использовать композиционные материалы на основе графита [21]. Использование графита в виде тонких плёнок, наносимых на различные поверхности, позволяет существенно снизить уровни звукового давления в помещении и повысить индексы звукоизоляции воздушного шума. Помимо тонких плёнок, графит можно использовать в качестве добавки в композиционных материалах звукоизоляционного назначения.

Значительного повышения индекса звукоизоляции воздушного шума добились в многослойных акустических конструкциях на основе тонкого целлюлозного волокна с графитовым покрытием и перегородках поэлементной сборки с использованием стекло-магнетитовых листов и звукоизоляционного слоя, состоящего из многослойного целлюлозного волокна с графитовым покрытием и стекловаты. Поглощение звуковых волн связано со строением кристаллической решетки графита, которая схожа со строением метаматериалов.

С помощью программного комплекса Autodesk Ecotect Analysis были проведены исследования наилучшей пригодной формы наносимого слоя материала, для изучения его акустических характеристик. Программным комплексом Autodesk был произведен расчет времени реверберации в модельных камерах с различной геометрией звукопоглощающих перегородок. За основу в расчетах использовали помещение объемом 60 м<sup>2</sup> 5×5×2,4 м (рис. 3).

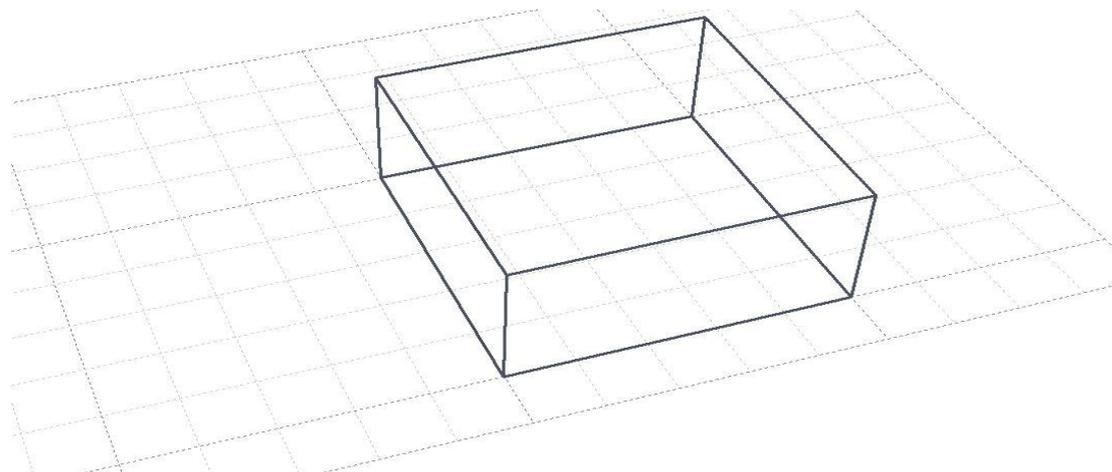


Рис. 3. Модель помещения без перегородки

Для данной модели помещения рассчитано время реверберации по методикам, разработанными В. Сэбином и С. Эйрингом, таблица 3.

Таблица 3

**Время реверберации в помещении без перегородки в различных частотных диапазонах**

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,68	0,67
125Гц	0,81	0,83
250Гц	1,25	1,18
500Гц	1,38	1,45
1кГц	0,46	0,47
2 кГц	0,33	0,33
4 кГц	0,25	0,26
8 кГц	0,11	0,11
16 кГц	0,12	0,12

В следующей модели, при тех же характеристиках и объеме помещения, была изменена геометрия одной плоскости в виде прямой перегородки (рис. 4) и рассчитано время реверберации, таблица 4. Объем перегородки составил 9 м<sup>2</sup>.

метрия одной плоскости в виде прямой перегородки (рис. 4) и рассчитано время реверберации, таблица 4. Объем перегородки составил 9 м<sup>2</sup>.

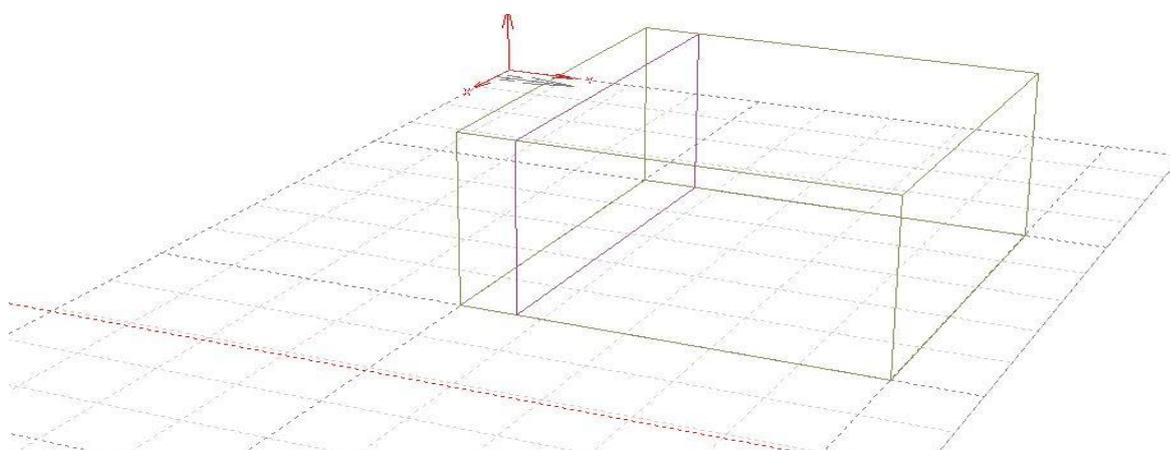


Рис. 4. Модель помещения с прямой перегородкой

При установке перегородки время реверберации снижается.

Далее, в качестве модели, рассчитывали время реверберации для перегородки с треугольными ячейками при фиксированном объеме помещения и перегородки (рис. 5).

Таблица 4

**Время реверберации в помещении с прямой перегородкой в различных частотных диапазонах**

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,51	0,5
125Гц	0,63	0,65
250Гц	1,07	1
500Гц	1,23	1,15
1кГц	0,26	0,26
2 кГц	0,18	0,18
4 кГц	0,13	0,14
8 кГц	0,1	0,1
16 кГц	0,09	0,09

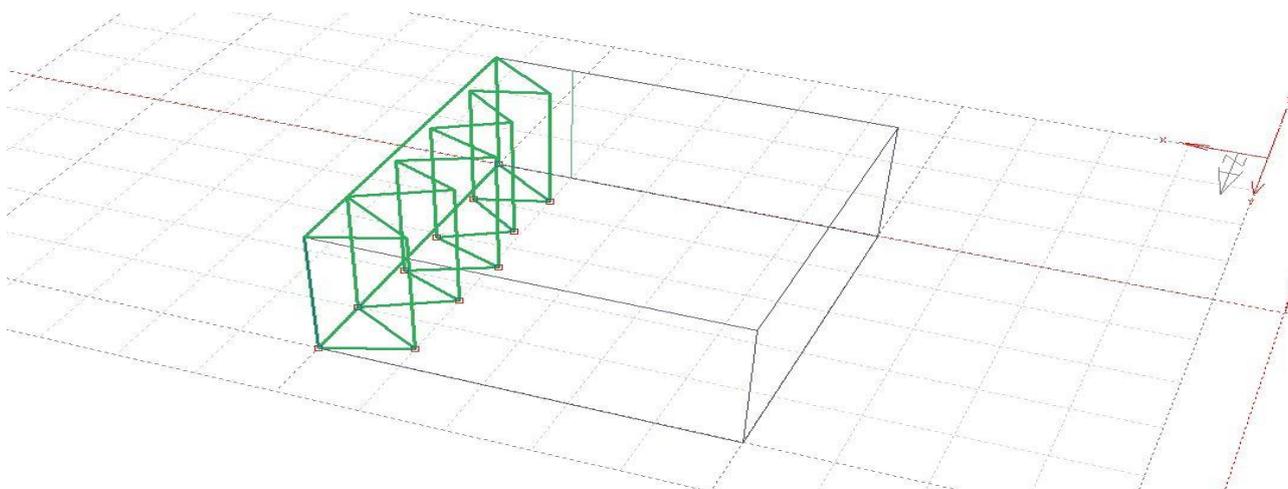


Рис. 5. Модель помещения с перегородкой с треугольными ячейками

Изменение геометрии перегородки приводит к уменьшению времени реверберации, что

положительно сказывается на акустических характеристиках в жилых и производственных помещениях (табл. 5).

Таблица 5

**Время реверберации в помещении с перегородкой с треугольными ячейками в различных частотных диапазонах**

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,44	0,47
125Гц	0,56	0,58
250Гц	1	0,93
500Гц	1,23	1,12
1кГц	0,2	0,2
2 кГц	0,15	0,15
4 кГц	0,09	0,1
8 кГц	0,08	0,08
16 кГц	0,07	0,07

Для изготовления композитного материала звукоизолирующей панели использовался графит ГЛС-1, поливинилацетат, метасиликат

натрия и вода в соотношении 2:1,5:1:1 соответственно. При этом композиция должна обладать следующими свойствами:

- быстрая схватываемость материала;

- пригодность для изготовления штамповочным методом;
- термостойкость.

Индекс звукоизоляции  $R_w$  полученных панелей определяли в сконструированной модельной камере по стандартной методике. Для плоской панели  $R_w$  составил 30 дБ, для панели с пирамидальными ячейками – 36 дБ при толщине конструкций 35 мм, рисунок 6. Для сравнения, конструкция из двух листов гипсокартона по 12 мм с заполнением минеральной ватой 50 мм имеет индекс звукоизоляции 36 дБ.



Рис. 6. Внешний вид акустической графитовой панели

Испытания звукоизоляционных панелей на огнезащитную эффективность проводили в соответствии с ГОСТ Р 53292-2009. «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний.» Определили, что композиция относится к I группе огнезащитной эффективности и может быть рекомендована для использования в качестве огнезащитного материала.

#### Выводы

1. Рассчитано время реверберации в модельных камерах с различной конфигурацией перегородок. Определена оптимальная конфигурация перегородки с пирамидальными ячейками для снижения времени реверберации в помещениях.

2. Показано, что благодаря высокому коэффициенту внутренних потерь за счет слоистого строения кристаллической решетки графита, с акустической точки зрения композиционные материалы эффективны по сравнению с традиционными панелями.

3. Предложенный композиционный материал является эффективным поглощающим средством, который решает задачи в архитектурной акустике, подавления эха в строительстве и архитектуре. Схожие с метаматериалами, природные и искусственные графиты позволяют решать эти задачи при небольших объемах и массах с применением простых не дорогостоящих технологий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цвиккер К., Костен К. Звукопоглощающие материалы. М.: ИЛ, 1952. 160 с.
2. Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers (theory, design, and applications). London: Spon Press, 2006. 405 p.
3. Handbook of noise and vibration control / Ed. Crocker M.J. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1570 p.
4. Авиационная акустика / Под ред. Мунина А.Г. и Квитки В.Е. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
5. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Томаровщенко О.Н. Основы безопасности жизнедеятельности: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 224 с.
6. Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T.M., Morozov K.D., Bakhtin B.N. Potential of sound absorbers based on acoustic metamaterials // Proc. 23rd Intern. Congr. Sound and Vibr. (Athens, Greece, 2016). URL: [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2016\\_icsv23/content/papers/papers/full\\_paper\\_825\\_20160530175723879.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_825_20160530175723879.pdf). (дата обращения: 11.12.2020)
7. Tomilina T.M., Bobrovnikskii Yu.I., Bakhtin B.N. Impedance design of efficient metamaterial sound absorbers // Proc. 24th Intern. Congr. Sound and Vibr. (London, UK, 2017). URL: [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2017\\_icsv24/content/papers/papers/full\\_paper\\_1228\\_20170602183158834.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1228_20170602183158834.pdf). (дата обращения: 03.02.2021)
8. Jimenez N., Huang W., Romero-Garcia V., Pagneux V., Groby J.-P. Ultrathin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption // App. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. № 121902. URL: [http://perso.univ-lemans.fr/~jprogroby/Publication/ArticleAPL\\_2016.pdf](http://perso.univ-lemans.fr/~jprogroby/Publication/ArticleAPL_2016.pdf). (дата обращения: 03.04.2021)
9. Jimenez N., Romero-Garcia V., Cebrecos A., Pico R., Sanchez-Morcillo V.J., Garcia-Raffi L.M. Broadband quasi perfect absorption using chirped multi-layer porous materials // AIP Advances. 2016. Vol. 6. № 121605. URL: [https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered\\_chirped\\_porous.pdf](https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered_chirped_porous.pdf). (дата обращения: 03.04.2021)
10. Ng J., Chen H., Chan C.T. Metamaterial frequency-selective superabsorber // Optics Letts. 2009. Vol. 34. № 5. Pp. 644–646.
11. Popa B.I., Zigoneanu L., Cummer S.A. Tunable active acoustic metamaterials // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. № 024303. URL: [http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158\\_Popa13\\_ActiveAcousticMM.pdf](http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158_Popa13_ActiveAcousticMM.pdf). (дата обращения: 03.04.2021)

12. Popa B.I., Shinde D., Konneker A., Cummer S.A. Active acoustic metamaterials reconfigurable in real time // *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 91. № 220303. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.00453.pdf>. (дата обращения: 15.02.2021)

13. Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томилина Т.М. Периодическая поверхностная структура с экстремальными акустическими свойствами // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 2. С. 147–151.

14. Mao S., Chen S., Huang C. Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines, *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.* 2005. Vol. 53. № 4. Pp. 1515–1521.

15. Szabo Zs., Park G., Hedge R., Li E. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship, *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.* 2010. Vol. 58. № 10. Pp. 2646–2653.

16. Fang N., Xi D., Xu J., Ambati M., Srituravanich W., Sun C., Zhang X. Ultrasonic metamaterials with negative modulus, *Nature*. 2006. Vol. 5. Doi: 10.1038/nmat1644. Epub 2006 Apr 30.

17. Astley R.J., Agarwal A., Holland K.R., Joseph P.F., Self R.H., Smith M.G., Sugimoto R., Tester B.J. Predicting and reducing aircraft noise // *Proc. 14th Intern. Congr. Sound and Vibr.* (Cairns, Australia, 2007). URL: [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf). (дата обращения: 26.09.2020)

18. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М. Научные основы создания упругих структур со специальными виброакустическими свойствами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 5. С. 3–11.

19. Sabine W.C. *Collected papers on acoustics*. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1923. 350 p.

20. Eyring C.F. Method of calculating the averaged coefficient of sound absorption // *J. Acoust. Soc. Am.* 1933. Vol. 4. Pp. 178–192.

21. Фанина Е.А. Разработка функциональных композиционных материалов для улучшения звукоизоляционных характеристик транспортных средств // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2012. № 59. С. 237–241.

#### *Информация об авторах*

**Фанина Евгения Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: [evgenia-@mail.ru](mailto:evgenia-@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 24.03.2021 г.

© Фанина Е.А., 2021

#### **Fanina E.A.**

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

*E-mail: [evgenia-@mail.ru](mailto:evgenia-@mail.ru)*

### **EFFICIENT ACOUSTIC COMPOSITE PANELS BASED ON GRAPHITE**

**Abstract.** A set of experimental studies is carried out to determine the acoustic characteristics of three-dimensional panels of fixed thickness made of carbon-based composite material installed in the opening between the reverberation chambers. Sound insulation indices are determined when they are excited by a diffuse sound field in wide frequency ranges. The reverberation time in model chambers with different partition configurations is calculated. The optimal configuration of the partition with pyramidal cells to reduce the reverberation time in the rooms is determined. The use of graphite in the form of thin membrane applied to various surfaces can significantly reduce the sound pressure levels in the room and increase the sound insulation indices of air noise. In addition to thin membrane, graphite can be used as an additive in composite materials for sound insulation purposes. It is shown that the characteristics of such panels are quite universal. The measured acoustic characteristics of composite panels are compared with similar characteristics of traditional materials. It is determined that the composition belongs to the I group of fire-retardant efficiency and can be recommended for use as a fire-retardant material. The developed acoustic material is an effective absorbing agent that solves problems in architectural acoustics, echo cancellation in construction and architecture. Similar to metamaterials, natural and artificial graphites allow to solve these problems with small volumes and masses using simple and inexpensive technologies.

**Keywords:** sound absorption, sound insulation index, composite panel, carbon-graphite material.

## REFERENCES

1. Kolyadin A.P. Formations and development of 1. Zwicker K., Kosten K. Sound-absorbing materials [Zvukopogloshchayushchie materialy]. Moscow: IL, 1952. 160 p. (rus)
2. Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers (theory, design, and applications). London: Spon Press, 2006. 405 p.
3. Handbook of noise and vibration control. Ed. Crocker M. J. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1570 p.
4. Aviation acoustics [Aviacionnaya akustika]. Ed. Munina A. G. and Kvitki V. E. M.: Mashinostroenie, 1973. 448 p. (rus)
5. Lopanov A.N., Fanina E.A., Tomarovshchenko O.N. Fundamentals of life safety [Osnovy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti]: a textbook. Belgorod: BSTU Publishing House. 2015. 224 p. (rus)
6. Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T. M., Morozov K.D., Bakhtin B.N. Potential of sound absorbers based on acoustic metamaterials. Proc. 23rd Intern. Congr. Sound and Vibr. (Athens, Greece, 2016). URL: [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2016\\_icsv23/content/papers/papers/full\\_paper\\_825\\_20160530175723879.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_825_20160530175723879.pdf). (date of treatment: 11.12.2020)
7. Tomilina T.M., Bobrovnikskii Yu.I., Bakhtin B.N. Impedance design of efficient metamaterial sound absorbers. Proc. 24-th Intern. Congr. Sound and Vibr. (London, UK, 2017). [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2017\\_icsv24/content/papers/papers/full\\_paper\\_1228\\_20170602183158834.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1228_20170602183158834.pdf). (date of treatment: 03.02.2021)
8. Jimenez N., Huang W., Romero-Garcia V., Pagneux V., Groby J.-P. Ultrathin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. App. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. No 121902. URL: [http://perso.univ-lemans.fr/~jpgroby/Publication/ArticleAPL\\_2016.pdf](http://perso.univ-lemans.fr/~jpgroby/Publication/ArticleAPL_2016.pdf). (date of treatment: 03.04.2021)
9. Jimenez N., Romero-Garcia V., Cebrecos A., Pico R., Sanchez-Morcillo V.J., Garcia-Raffi L.M. Broadband quasi perfect absorption using chirped multi-layer porous materials. AIP Advances. 2016. Vol. 6. No 121605. URL: [https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered\\_chirped\\_porous.pdf](https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered_chirped_porous.pdf). (date of treatment: 03.04.2021)
10. Ng J., Chen H., Chan C.T. Metamaterial frequency-selective superabsorber. Optics Letts. 2009. Vol. 34. No 5. Pp. 644–646.
11. Popa B.I., Zigoneanu L., Cummer S.A. Tunable active acoustic metamaterials. Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. No 024303. URL: [http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158\\_Popa13\\_ActiveAcousticMM.pdf](http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158_Popa13_ActiveAcousticMM.pdf). (date of treatment: 03.04.2021)
12. Popa B.I., Shinde D., Konneker A., Cummer S.A. Active acoustic metamaterials is reconfigurable in real time. Phys. Rev. B. 2015. Vol. 91. No. 220303. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.00453.pdf>. (date of treatment: 15.02.2021)
13. Bobrovnikskii, Y. I., Morozov K. D., T. M. Tomilina Periodic surface structure with extreme acoustic properties of the Classic. Journal. 2010. Vol. 56. No. 2. Pp. 147–151.
14. Mao S., Chen S., Huang C. Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines, IEEE Trans. Microw. Theory and Tech. 2005. Vol. 53. No. 4. Pp. 1515–1521.
15. Szabo Zs., Park G., Hedge R., Li E. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship, IEEE Trans. Microw. Theory and Tech. 2010. Vol. 58. No. 10. Pp. 2646–2653.
16. Fang N., Xi D., Xu J., Ambati M., Srituravanich W., Sun C., Zhang X. Ultrasonic metamaterials with negative modulus, Nature. 2006. Vol. 5. Doi: 10.1038/nmat1644. Epub 2006 Apr 30.
17. Astley R.J., Agarwal A., Holland K.R., Joseph P. F., Self R.H., Smith M.G., Sugimoto R., Tester B.J. Predicting and reducing aircraft noise. Proc. 14-th Intern. Congr. Sound and Vibr. (Cairns, Australia, 2007). URL: [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf). (date of treatment: 26.09.2020)
18. Bobrovnikskiy Yu. I., Tomilina T. M. Scientific bases of creation of elastic structures with special vibroacoustic properties. Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2014. No. 5. Pp. 3–11.
19. Sabine W.C. Collected papers on acoustics. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1923. 350 p.
20. Eyring C. F. Method of calculating the averaged coefficient of sound absorption. J. Acoust. Soc. Am. 1933. Vol. 4. Pp. 178–192.
21. Fanina E. A. Development of functional composite materials for improving the sound insulation characteristics of vehicles [Razrabotka funkcional'nyh kompozicionnyh materialov dlya uluchsheniya zvukoizolyacionnyh harakteristik transportnyh sredstv]. Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University. 2012. No. 59. Pp. 237–241. (rus)

*Information about the authors*

**Fanina, Evgeniya A.** DSc, Professor. E-mail: evgenia-@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 24.03.2021*

**Для цитирования:**

Фанина Е.А. Эффективные акустические композиционные панели на основе графита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 82–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90

**For citation:**

Fanina E.A. Efficient acoustic composite panels based on graphite. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 82–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100

\*Дуюн И.А., Чуев К.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: duyun77@mail.ru

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье представлена методика прогнозирования и анализа эффективности использования гибких производственных систем и роботизированных комплексов. В качестве инструментов анализа применены имитационное моделирование и теория массового обслуживания. Производственная программа выпуска изделий, имеющая определенную номенклатуру и объемы выпуска, представлена потоком заявок. Производственный процесс моделируется во времени и прогнозируются различные технологические ситуации. Вычислительный эксперимент проводился на базе разработанной программы с применением парадигмы объектно-ориентированного программирования на языке Python. Реализована вероятностная модель зависимости показателей качества работы линии от производственной программы изготовления деталей. Варианты производственных программ представлены в виде комбинаций полей рассеивания этапов жизненного цикла: периодичности поступления деталей и времени обработки на станках. Периодичность поступления заготовок на линию обработки аппроксимирована экспоненциальным законом, время выполнения механической обработки на станках – законом нормального распределения. Выполнен ряд серий вычислительных экспериментов и проанализированы их результаты, характеризующие стабильность работы линии через значения показателей качества: сменной загрузки станков, загрузки накопителя деталей, вероятности его переполнения. Выявлены основные закономерности, обеспечивающие высокие показатели сменной загрузки оборудования, а также факторы, приводящие к их снижению.

**Ключевые слова:** бережливое производство, гибкие производственные системы (ГПС), роботизированные комплексы, имитационное моделирование, теория массового обслуживания, показатели эффективности.

**Введение.** Основной тенденцией развития современного производства является широкое применение гибких производственных систем и роботизированных комплексов. Это связано с необходимостью обеспечения высокой эффективности производства за счет повышения производительности и качества выпускаемой продукции, применения технологий, снижающих влияние человека на производственный процесс [1–3]. Внедрение высокотехнологичного и высокопроизводительного оборудования связано, как правило, с необходимостью дополнительных капитальных затрат на приобретение оборудования и реорганизацию производства и должно быть экономически обосновано. Использование более производительного оборудования повышает объем выпускаемой продукции и, следовательно, снижает ее себестоимость за счет изменения соотношения прямых производственных затрат к единице продукции. Однако, при этом данное оборудование за счет своей высокой стоимости повышает фондоемкость производства, и в некоторых случаях может оказаться экономически

нецелесообразным. Критерием эффективности модернизации производства является обеспечение определенных значений ряда технико-экономических показателей, таких как себестоимость единицы продукции, фондоемкость, коэффициент загрузки оборудования. Экономия прямых издержек в расчете на единицу продукции должна превышать исходные капитальные вложения. В связи с этим решение вопросов расчета и прогнозирования технико-экономических показателей эффективности производства в различных условиях его организационной структуры, в том числе с использованием математического моделирования, является важной научной и практической задачей [4–17].

**Методология.** Одним из важных показателей экономической эффективности производства, в том числе в условиях его модернизации и применения гибких производственных систем и робототехнических комплексов, является коэффициент загрузки оборудования. Данный показатель должен иметь значение не ниже порогового,

в противном случае дорогостоящее оборудование будет иметь большой срок окупаемости, а производство высокую фондоемкость. Особенно остро вопрос обеспечения приемлемых значений коэффициента загрузки оборудования стоит в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства [18, 19]. Данный тип производства широко распространен и составляет около 60–70 % производства в целом.

Для прогнозирования и анализа данного показателя в условиях различных структурных формирований производства предлагается использовать инструменты имитационного моделирования и теории массового обслуживания. Под имитационным моделированием в данном случае понимается вычислительный эксперимент, позволяющий имитировать во времени реальный производственный процесс, прогнозировать различные технологические ситуации, отображать вероятность появления позитивных и негативных проявлений в зависимости от вектора входных параметров. Математический аппарат теории массового обслуживания применен для анализа потока заявок [20], под которым понимается производственная программа выпуска изделий, имеющая определенную номенклатуру и объемы выпуска.

**Основная часть.** Имитационное моделирование проводилось для анализа эффективности мелкосерийного машиностроительного производства. В качестве анализируемой производственной структуры принята гибкая производственная система (ГПС) из четырех обрабатывающих центров, оснащенных роботами манипуляторами и накопителями деталей. Технологический цикл имеет параллельно-последовательную структуру: два центра имеют возможность обрабатывать поступающие детали последовательно, вторая пара центров работает параллельно. Таким образом, система включает две параллельные линии по два центра. ГПС предназначена для обработки разнообразных деталей в рамках производственной программы. Целью моделирования является выявление негативных производственных ситуаций, снижающих коэффициент загрузки оборудования, и определение технологических условий, обеспечивающих максимально полную загрузку обрабатывающих центров.

Для реализации вычислительного эксперимента на языке высокого уровня Python была разработана программа с применением концепции объектно-ориентированного программирования. Программа предполагает возможность моделирования детерминированных и случайных процессов. Детерминированный процесс оперирует

известными, однозначно определенными исходными данными: периодичность поступления деталей на первый станок, время обработки деталей на каждом из станков. Результатом моделирования является имитация технологического цикла в течение заданного времени, например, рабочей смены, с выбранным шагом. Детерминированный расчет приемлем для моделирования цикла обработки определенного типа изделия. Однако, больший интерес представляет моделирование случайных процессов. С этой целью в программу встроен генератор псевдослучайных чисел (ПСЧ), который формирует последовательности случайных чисел на основе трех методов: средних квадратов, иррационального числа и конгруэнтного. В соответствии с исходными условиями решаемой задачи последовательность ПСЧ может подчиняться закону нормального распределения или показательному закону. Для проверки соответствия полученной последовательности ПСЧ заданному закону распределения используются критерии согласия Колмогорова, Пирсона и корреляционный момент, предусмотрено также визуальное отображение в виде гистограммы. Сгенерированная последовательность независимых случайных величин используется для задания входных параметров (время поступления деталей, время обработки детали на первом и втором станках, время обработки дополнительных деталей) и имитирует производственную программу предприятия, содержащую определенную номенклатуру различных изделий, технологический маршрут изготовления которых имеет различное операционное время. Результаты вычислительного эксперимента представлены в виде протокола моделирования, отражающего состояние системы на каждом шаге модельного времени. Для удобства обработки результаты анализа протокола экспортируются в отдельный файл Excel и состоят из следующих величин: степеней загрузки станков линии, степени загрузки накопителя, вероятности переполнения накопителя, количества обработанных деталей.

**Результаты.** С применением разработанной программы, были проведены вычислительные эксперименты, направленные на выявление закономерностей изменения параметров качества исследуемой системы при задании различных входных условий. Использована вероятностная модель: производственная программа изготовления деталей (ППИД) представлена в виде совокупности полей рассеивания случайных величин, отображающих различные временные этапы жизненного цикла изделий. Периодичность поступления заготовок на линию обработки аппроксимиро-

вана экспоненциальным законом, время выполнения механической обработки на станках – законом нормального распределения. При проведении вычислительных экспериментов для получения адекватных результатов использовалась статистически значимая выборка, то есть для каждого варианта производственной программы

проводилось не менее 50 вычислительных экспериментов. После проведения достаточного числа опытов моделирования, выполнялся анализ полученных результатов: вычислялись средние значения параметров качества, а также выполнялось графическое отображение результатов в виде гистограммы.

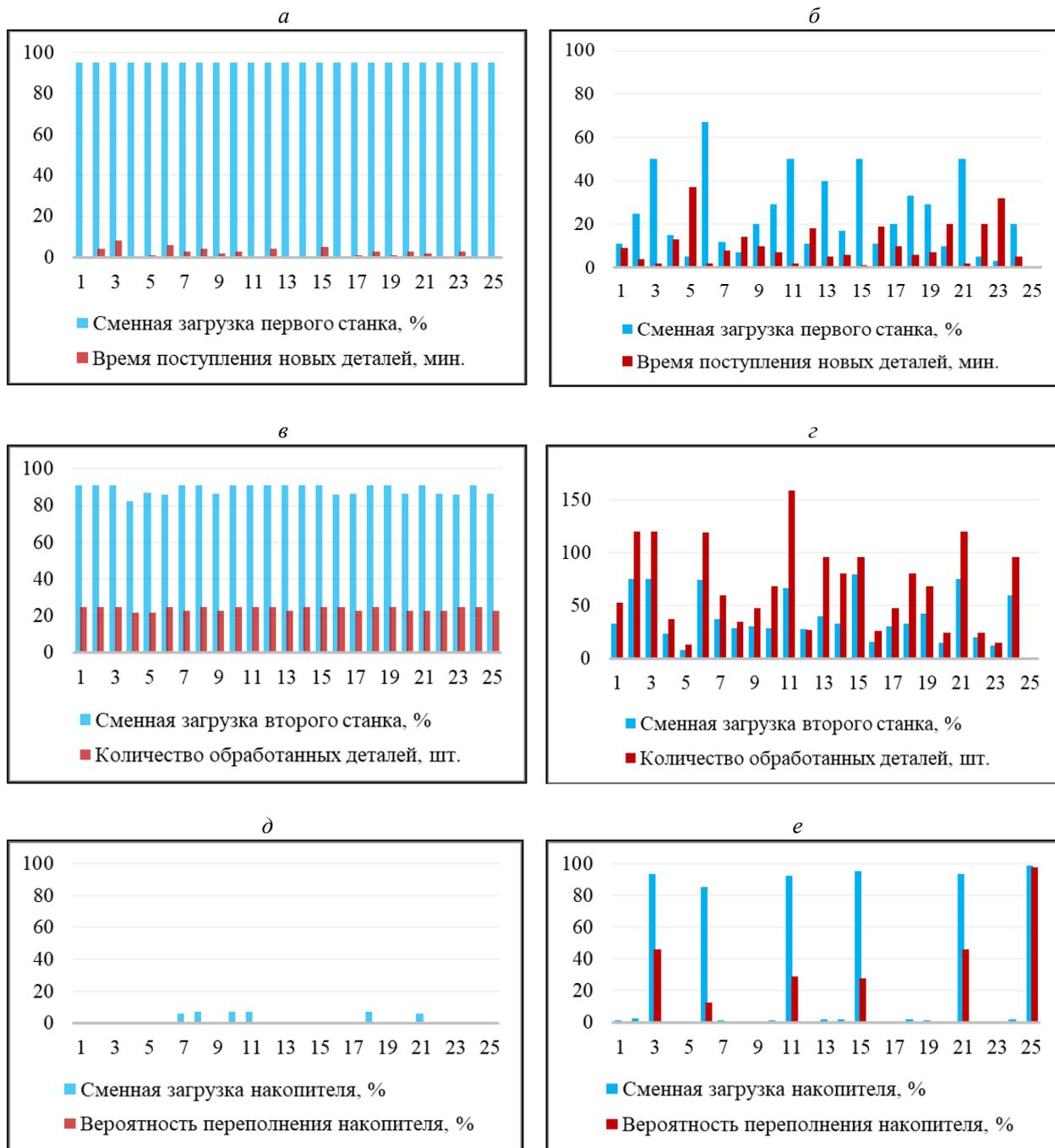


Рис. 1. Результаты моделирования (а, в, д – первый вариант ППИД; б, з, е – второй вариант ППИД): а, б – корреляционные сочетания сменной загрузки первого станка и периодичности поступления заявок; в, з – корреляционные сочетания количества обработанных деталей и сменной загрузки второго станка; д, е – корреляционные сочетания сменной загрузки накопителя и вероятности его переполнения

В ходе анализа результатов первых экспериментов были выявлены некоторые зависимости: загруженность первого станка определяется вре-

менем поступления новых деталей, загруженность второго станка напрямую влияет на количество обрабатываемых деталей, а степень загру-

женности накопителя коррелирует с вероятностью переполнения накопителя. В связи с этим было принято решение объединить описанные пары в гистограммы с группировкой с целью наглядного отображения существующих закономерностей. Описанные соотношения, а также другие зависимости параметров качества от входных условий, наиболее рационально проанализировать при рассмотрении двух предельных случаев: комплекс работает стабильно и имеет параметры качества, приближенные к идеальным (рис. 1, а, в, д), комплекс работает не стабильно и имеет неудовлетворительные параметры качества (рис. 1, б, г, е).

Необходимо отметить, что для упрощения визуальной оценки в гистограммы включены не все, а по 25 вычислительных экспериментов. Как видно, полученные соотношения действительно диаметрально противоположны. Интерес представляют причины возникновения этих ситуаций, которые заключаются в исходных условия моделирования, представленных на рис. 2. Для первого «идеального» случая центры группирования времени обработки на обоих станках одинаковы, а поля их рассеивания имеют узкий диапазон, при этом максимальное значение поля рассеивания периодичности поступления заготовок

меньше минимального значения поля рассеивания времени обработки детали первым станком. Вследствие этого комплекс работает стабильно и без простоев в течении выполнения всей производственной программы, о чем свидетельствуют высокие показатели сменной загрузки станков — 90-95 % (рис. 1, а, в). Во втором случае реализован ряд неблагоприятных условий: центр группирования поля рассеивания времени обработки на первом станке меньше центра группирования поля рассеивания времени обработки второго станка, поля рассеивания для обоих станков существенно шире, кроме того поле рассеивания периодичности поступления заготовок перекрывает поле рассеивания времени обработки деталей первым станком. Перечисленные факторы негативно влияют на результат и вносят некоторую хаотичность в работу комплекса: первый станок большую часть времени простаивает, его сменная загрузка в рамках производственной программы колеблется в диапазоне 5-50 % и только для одного наименования детали составляет 65 %, как следствие простаивает также второй станок, его средняя сменная загрузка составляет около 35 %, так как время работы станков не согласовано для большей части деталей производственной программы (рис. 1, б, г).

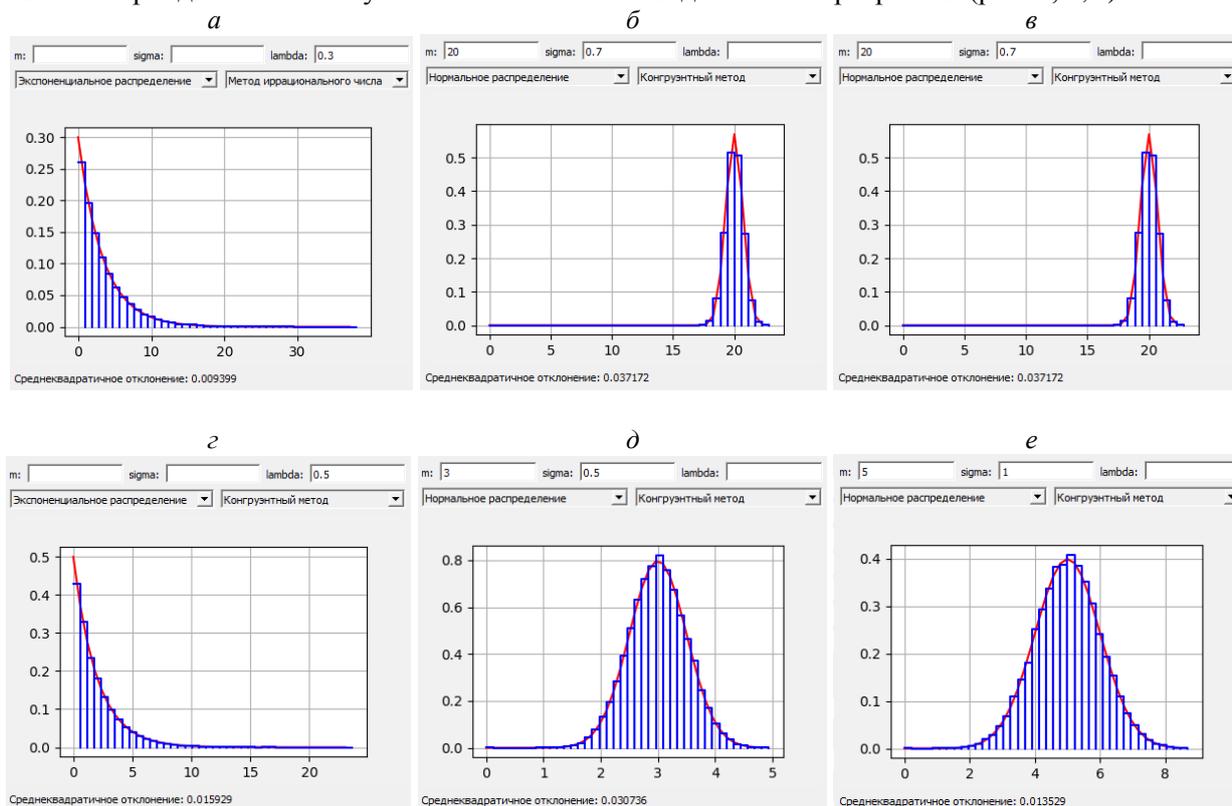


Рис. 2. Исходные данные моделирования: (а, б, в – первый вариант ППИД; г, д, е – второй вариант ППИД): а, г – поле рассеивания периодичности поступления заготовок на первый станок, мин; б, д – поле рассеивания времени обработки на первом станке, мин; в, е — поле рассеивания времени обработки на втором станке, мин

Несогласованность времени работы станков приводит также к высокой вероятности переполнения накопителя деталей, что недопустимо и требует увеличения его размера. В первом же случае накопитель практически свободен и можно свести его объем к минимуму, что сократит производственную площадь. Несомненно, в условиях реального производства редко встреча-

ются описанные выше крайние ситуации, поэтому для более полного анализа были проведены серии вычислительных экспериментов для других возможных сочетаний исходных данных с использованием представленной методики. Исходные данные вычислительных серий приведены в табл. 1, а полученные результаты моделирования – в табл. 2.

Таблица 1

## Исходные данные имитационного моделирования

№ серии вычисл. эксперимента	Периодичность поступления деталей, мин (характеристика экспоненциального закона)		Параметры времени обработки на станке №1, мин (характеристики нормального закона распределения)			Параметры времени обработки на станке №2, мин (характеристики нормального закона распределения)		
	$\lambda$	интервал, мин	$m$	$\sigma$	поле рассеивания, мин	$m$	$\sigma$	поле рассеивания, мин
1	0,1	[0; 60]	3	0,5	[1; 5]	5	1	[1,9]
2	0,8	[0; 10]	3	0,5	[1; 5]	5	1	[1,9]
3	0,3	[0; 20]	10	2	[2; 18]	15	2	[7,23]
4	0,2	[0; 40]	15	2	[7; 23]	20	2	[12,28]
5	0,5	[0; 15]	3	0,1	[2,5; 2,5]	5	0,5	[3;8]
6	0,8	[0; 10]	3	0,1	[2,5; 3,5]	5	0,5	[3;8]
7	0,3	[0; 20]	10	1	[6; 13]	15	1	[11;19]
8	0,2	[0; 40]	15	1	[11; 19]	20	1	[16,24]
9	0,3	[0; 20]	20	0,7	[17,5; 22,5]	20	0,7	[17,5; 22,5]
10	0,25	[0; 30]	20	1,2	[15; 25]	20	1,2	[15; 25]
11	0,2	[0; 40]	20	2,5	[10; 30]	20	2,5	[10; 30]
12	0,18	[0; 45]	20	4	[5; 35]	20	4	[5; 35]
13	0,3	[0; 20]	15	0,7	[12,5; 17,5]	25	0,7	[23,5; 27,5]
14	0,25	[0; 30]	15	1,2	[10; 20]	25	1,2	[20; 30]
15	0,2	[0; 40]	15	2,5	[5; 25]	25	2,5	[15; 35]
16	0,3	[0; 20]	25	0,7	[23,5; 27,5]	15	0,7	[12,5; 17,5]
17	0,25	[0; 30]	25	1,2	[20; 30]	15	1,2	[10; 20]
18	0,2	[0; 40]	25	2,5	[15; 35]	15	2,5	[5; 25]

Таблица 2

## Результаты имитационного моделирования показателей качества работы ГПС

№ серии вычисл. эксперимента	Степень загрузки накопителя, %	Вероятность переполнения накопителя, %	Степень загрузки станка №1, %	Степень загрузки станка №2, %	Сменная выработка деталей, шт.
1	26,63	9,65	28,70	44,31	76
2	82,18	18,69	57,32	74,49	120
3	54,54	4,73	86,68	88,92	36
4	31,77	0,32	91,74	90,03	25
5	79,71	20,23	49,46	71,38	107
6	90,41	18,68	55,28	75,71	115
7	59,47	3,78	87,16	91,01	35
8	34,38	0,20	90,36	91,09	25
9	1,50	0,00	95,00	88,90	24
10	2,77	0,00	94,98	87,27	24
11	7,18	0,01	94,58	78,35	23
12	9,12	0,25	94,50	77,76	23
13	57,95	2,09	93,00	93,02	20
14	53,69	2,55	88,62	89,31	19
15	44,92	3,92	90,64	91,99	21
16	0,40	0,00	96,00	51,07	19
17	0,38	0,00	92,16	47,30	18
18	0,40	0,00	95,86	47,73	19

Результаты содержат средние сменные показатели работы линии для условий выполнения различных вариантов производственных программ. Рассмотренные выше предельные варианты представлены под номерами серий №9 и №2.

В целом высокие значения коэффициентов загрузки станков (более 85%) наблюдаются при условии, когда центр группирования поля рассеивания времени работы первого станка меньше соответствующего параметра второго станка и обеспечена бесперебойность поступления заготовок (вычислительные серии №3-4, №7-8, №13-15). Однако в некоторых случаях может возникнуть вероятность переполнения накопителя и необходимо увеличивать его объем. Если центры группирования полей рассеивания времени работы станков одинаковы (серии №9-12), то вероятность переполнения накопителя равна нулю, а сменная загрузка также высока. При этом расширение поля рассеивания с 5 до 30 минут снижает среднюю сменную загрузку второго станка с

89 % до 78 %. Повышение времени периодичности поступления заготовок на линию значительно влияет на сменную загрузку станков и при перекрытии полей рассеивания существенно ее снижает (серии №1-2, №5-6). Неблагоприятным условием является также ситуация, когда центр группирования поля рассеивания времени работы первого станка больше соответствующего параметра второго станка (серии №16-18). В этом случае при бесперебойной поставке заготовок на первый станок его сменная загрузка остается высокой (более 90 %), однако сменная загрузка второго станка резко падает до 50 %. В такой ситуации рациональным решением является параллельная загрузка второго станка дополнительными деталями. В данном случае при условии, что второй станок свободен и не занят обработкой основных деталей, на него поступает дополнительная деталь, после обработки которой второй станок может снова вернуться к обработке основных деталей либо продолжить обработку дополнительных при отсутствии деталей в накопителе.

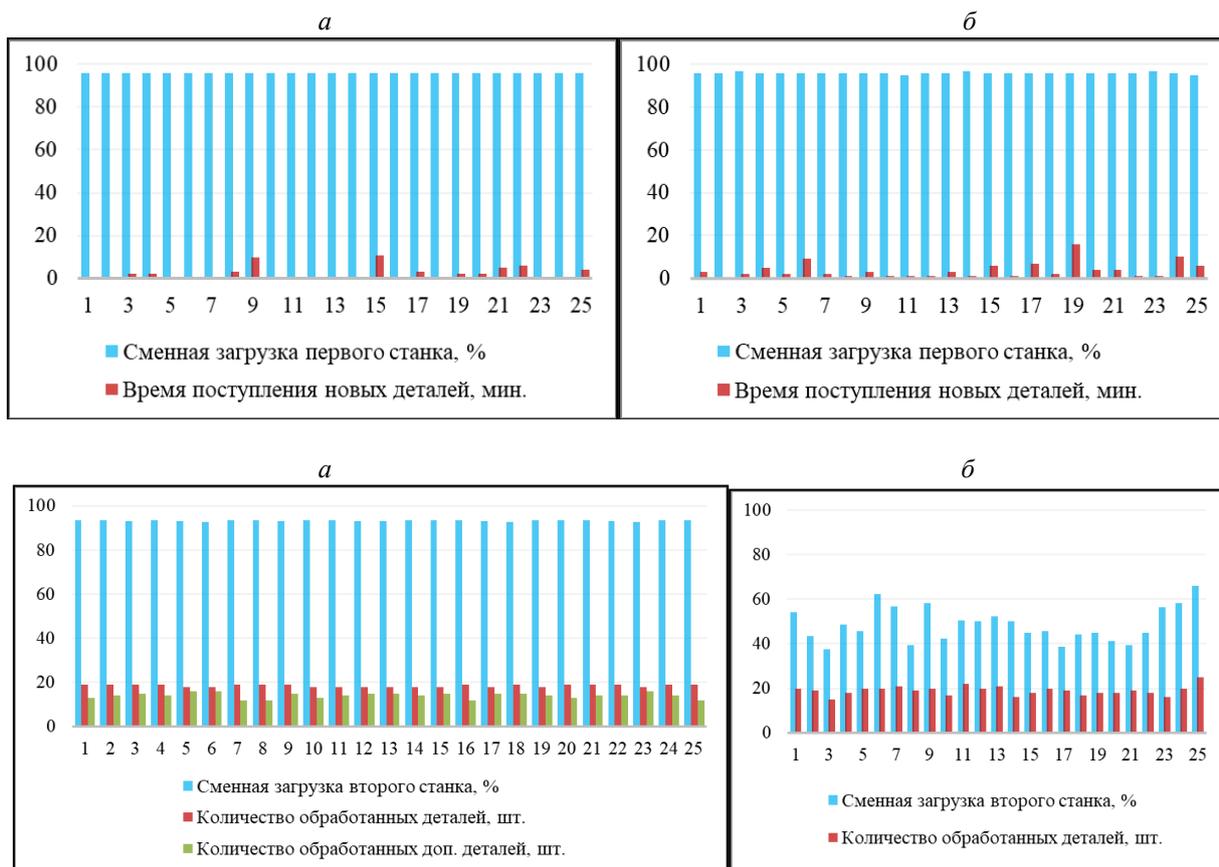


Рис. 3. Результаты моделирования вычислительной серии №18 (а, б – с загрузкой второго станка дополнительными деталями; в, г – без загрузки второго станка дополнительными деталями): а, б – корреляционные сочетания сменной загрузки первого станка и периодичности поступления заявок; в, г – корреляционные сочетания количества обработанных деталей и сменной загрузки второго станка

На рис. 3 представлен сравнительный анализ сменной загрузки станков по результатам вычислительной серии №18 с догрузкой второго станка дополнительными деталями. Использование дополнительных деталей для параллельной обработки на втором станке повышает сменную загрузку с 50 % до 90 %, но справедливо сделать уточнение, что количество обработанных основных деталей при параллельной загрузке второго станка не увеличится. Данный факт необходимо учитывать при планировании производства.

**Выводы.** Применение имитационного моделирования и теории массового обслуживания в задачах оценки и прогнозирования показателей эффективности работы ГПС и роботизированных комплексов, в частности коэффициента загрузки оборудования, показывает хорошие результаты и позволяет анализировать различные производственные ситуации, выявлять причины снижения технико-экономических показателей, определять организационные меры, направленные на снижение простоев оборудования и устранение потерь в жизненном цикле производства изделий. Так, наиболее благоприятными условиями функционирования линии, обеспечивающими стабильность работы и сменную загрузку оборудования свыше 90%, являются узкие поля рассеивания и близкие значения их центров группирования для времени обработки деталей на каждом из станков в пределах производственной программы. Расширение полей рассеивания снижает стабильность работы линии и сменную загрузку оборудования, так как повышает вероятность рассогласования синхронности работы станков. Самым неблагоприятным вариантом является существенное расхождение центров группирования полей рассеивания для отдельных станков и может вызвать серьезные производственные проблемы: переполнение накопителей деталей и простои оборудования. Представленная методика применима также в рамках концепции бережливого производства, так как направлена на выявление и устранение причин снижения эффективности использования оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клочков В.В. Экономические проблемы создания центров специализации в отраслях машиностроения (на примере авиационной промышленности) // Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики. 2017. Т. 1. С. 87–97.
2. Рахлис Т.П. Экономическая оценка цифровой трансформации промышленного предприятия // Экономика и предпринимательство. 2019. № 12 (113). С. 1265–1270.
3. Тарасов И.В., Попов Н.А. Индустрия 4.0: трансформация производственных фабрик // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3 (106). С. 38–53.
4. Аблязов К.А., Аблязов Э.К. Использование информационных технологий для имитационного моделирования технологических операций погрузочно-разгрузочных работ на причалах морского порта // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 2 (83). С. 5–10.
5. Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шептунов С.А. Автоматизация нормирования операций производства изделий на оборудовании с ЧПУ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 6. С. 57–67.
6. Васильев Л.В., Васильева Т.Н., Васильев В.И. Влияние информационных технологий на повышение качества и конкурентоспособности продукции // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2004. № 3 (4). С. 16–18.
7. Войтоловский Н.В., Купоров Ю.Ю., Лаврентьева О.О. Оценка организационных форм гибких производственных систем при использовании промышленной робототехники // Журнал правовых и экономических исследований. 2016. № 2. С. 122–127.
8. Лукьянец С.В., Снисаренко С.В., Лишай М.А. Имитационное моделирование четырех-прессовой линии штамповки деталей // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 2 (112). С. 92–97.
9. Сердюк А.И., Рахматуллин Р.Р., Кузнецова Е.В. Использование метода циклограмм в предпроектных исследованиях гибких производственных систем // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. № 1 (3). С. 68–76.
10. Мальцева О.С. Моделирование организационно-технологических структур цехов и участков листовой штамповки // Вестник МГТУ Станкин. 2013. № 2 (25). С. 96–98.
11. Теперев А.С., Субботин С.А. Система мониторинга загрузки испытательного оборудования на предприятии // Трибуна ученого. 2019. № 10. С. 23–30.
12. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической об-

работки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 105–114.

13. Башарова А.А., Котельников М.А., Щенятский А.В. Обзор накопительных устройств и критериев их проектирования на примере участка токарно-револьверных станков с чпу ga-2600 и ga-2600/300 // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1 (28). С. 23–26.

14. Бешевли О.Б., Бушуев Д.А., Дуюн Т.А., Рубанов В.Г. Имитационное моделирование динамических характеристик модуля для обработки крупногабаритных подшипников скольжения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 149–156.

15. Зак Ю.А. Принципы построения систем имитационного моделирования производственных систем // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 11. С. 705–713.

16. Дуюн Т.А., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В., Гринек А.В., Кариков Е.Б., Лесунов М.Е. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на

основе нечеткой логики // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 138–156.

17. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 61–65.

18. Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Проблема составления оптимального расписания дискретного мелкосерийного производства // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-11. С. 2340–2343.

19. Хаймович И.Н., Фролов М.А., Куралева Н.О. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства на основе имитационного моделирования гибких производственных линий в цехе // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2016. Т. 2. № 3. С. 208–213.

20. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа  $ra/m/1$ ,  $h2/m/1$  и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 217–251.

#### Информация об авторах

**Дуюн Иван Александрович**, студент кафедры технической кибернетики. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Чуев Кирилл Витальевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.03.2021 г.

© Дуюн И.А., Чуев К.В., 2021

**\*Duyun I.A., Chuev K.V.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*

*\*E-mail: duyun77@mail.ru*

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS AND ROBOTIC COMPLEXES USING SIMULATION

**Abstract.** The article presents a methodology for forecasting and analyzing the effectiveness of the use of flexible production systems and robotic systems. Simulation modeling and queuing theory are used as analysis tools. The production program for the release of products, which has a certain nomenclature and production volumes, is represented by a flow of applications. The production process is modeled over time and various technological situations are predicted. The computational experiment is conducted on the basis of the devel-

oped program using the object-oriented programming paradigm in Python. A probabilistic model of the dependence of the quality indicators of the line on the production program for manufacturing parts is implemented. Variants of production programs are presented in the form of combinations of dispersion fields of stages of the life cycle: frequency of receipt of parts and processing time on machine tools. The frequency of receipt of workpieces on the processing line is approximated by an exponential law; the time of mechanical processing on machines is approximated by the law of normal distribution. A number of series of computational experiments have been carried out and their results have been analyzed, which characterize the stability of the line operation through the values of quality indicators: changeable loading of machine tools, loading of a parts accumulator, the probability of its overflow. The main regularities are revealed that provide high indicators of the shift loading of equipment, as well as the factors leading to their decrease.

**Keywords:** lean manufacturing, flexible manufacturing systems (FMS), robotic systems, simulation, queuing theory, performance indicators.

## REFERENCES

1. Klochkov V.V. Economic problems of centers of specialization establishment in machine-building industries (on example of aviation industry) [Ekonomicheskie problemy sozdaniya centrov specializacii v otraslyah mashinostroeniya (na primere aviacionnoj promyshlennosti)]. Actual problems of economics and management at mechanical engineering enterprises, oil and gas industry in an innovation-oriented economy. 2017. Vol. 1. Pp. 87–97. (rus)
2. Rakhlis T.P. Economic assessment of digital transformation of an industrial enterprise [Ekonomicheskaya ocenka cifrovoj transformacii promyshlennogo predpriyatiya]. Economics and Entrepreneurship. 2019. No. 12 (113). Pp. 1265–1270. (rus)
3. Tarasov I.V., Popov N.A. Industry 4.0: production factories transformation [Industriya 4.0: transformaciya proizvodstvennyh fabrik]. Strategic decisions and risk management. 2018. No. 3 (106). Pp. 38–53. (rus)
4. Ablyazov K.A., Ablyazov E.K. Usage of information technology for a simulation technique of technological operations of loading-unloading works on the berths of the sea port [Ispol'zovanie informacionnyh tekhnologij dlya imitacionnogo modelirovaniya tekhnologicheskikh operacij pogruzochnorazgruzochnykh rabot na prichalah morskogo porta]. Operation of sea transport. 2017. No. 2 (83). Pp. 5–10. (rus)
5. Averchenkov A.V., Koloshkina I.E., Sheptunov S.A. Automation of introduction of norms of working operations on cnc equipment [Avtomatizaciya normirovaniya operacij proizvodstva izdelij na oborudovanii s CHPU]. Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University. 2020. No. 6. Pp. 57–67. (rus)
6. Vasiliev L.V., Vasilieva T.N., Vasiliev V.I. The impact of information technology on improving the quality and competitiveness of products [Vliyanie informacionnyh tekhnologij na povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti produkcii]. Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Information systems and technologies. 2004. No. 3 (4). Pp. 16–18. (rus)
7. Voytlovskiy N., Kuporov J., Lavrentieva O. The assessment of flexible manufacturing systems organizational forms in industrial robotics environment [Vliyanie informacionnyh tekhnologij na povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti produkcii]. Journal of Legal and Economic Research. 2016. No. 2. Pp. 122–127. (rus)
8. Lukyanets S.V., Snisarenko S.V., Lishay M.A. Simulation modeling of parts stamping line with four presses [Imitacionnoe modelirovanie chetyrekhpressovoj linii shtampovki detalej]. Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 2018. No. 2 (112). Pp. 92–97. (rus)
9. Serdjuk A.I., Rahmatullin R.R., Kuznetsova E.V. The use of sequence diagrams in the prestudy flexible manufacturing systems [Ispol'zovanie metoda ciklogramm v predproektnykh issledovaniyah gibkikh proizvodstvennyh sistem]. Mathematical and software systems in industrial and social spheres. 2013. No. 1 (3). Pp. 68–76. (rus)
10. Malceva O.S. Models of technical-organizational structures of sheet punching production units [Modelirovanie organizacionno-tekhnologicheskikh struktur cekhov i uchastkov listovoj shtampovki]. Bulletin of MSTU Stankin. 2013. No. 2 (25). Pp. 96–98. (rus)
11. Teperev A.S., Subbotin S.A. Test equipment load monitoring system at the enterprise [Sistema monitoringa zagruzki ispytatel'nogo oborudovaniya na predpriyatii]. Scientist tribune. 2019. No. 10. Pp. 23–30. (rus)
12. Duyun T.A., Grinek A.V., Rubanov V.G., Hurtasenko A.V. Mathematical modeling and optimization of machining processes as a means of controlling technological means based on fuzzy logic [Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya processov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove nechetkoj logiki]. In the collection: Regional scientific and technical conference on the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary topics, held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Belgorod State Technological

University named after V.V. Shukhov. 2015. Pp. 138–156. (rus)

13. Basharova A.A., Kotelnikov M.A., Shchenyatskiy A.V. Review of buffer units and their design criteria by the example of ga-2600 and ga-2600/300 nc turret lathe department [Obzor nakopitel'nyh ustroystv i kriteriev ih proektirovaniya na primere uchastka tokarno-revol'vernogo stankov s chpu ga-2600 i ga-2600/300]. Intelligent systems in production. 2016. No. 1 (28). Pp. 23–26. (rus)

14. Beshevli O.B., Bushuev D.A., Duyun T.A., Rubanov V.G. Simulation of the dynamic characteristics of a module for processing large-size plain bearings [Imitacionnoe modelirovanie dinamicheskikh harakteristik modulya dlya obrabotki krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniya]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2017. No. 8. Pp. 149–156. (rus)

15. Zak YU.A. Principles of building systems for simulation of production systems [Principy postroeniya sistem imitacionnogo modelirovaniya proizvodstvennykh sistem]. Information Technology. 2018. Vol. 24. No. 11. Pp. 705–713. (rus)

16. Duyun T.A., Rubanov V.G., Hurtasenko A.V., Grinek A.V., Karikov E.B., Lesunov M.E. Mathematical modeling and optimization of machining processes as a means of controlling technological parameters based on fuzzy logic [Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya processov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove nechetkoj logiki]. In the collection: Regional scientific and technical conference following the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary

topics, held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Belgorod State Technological University named after V.V. Shukhov. 2015. Pp. 138–156. (rus)

17. Duyun T.A., Grinek A.V., Saharov D.V. Modeling and optimization of technological processes of manufacturing products using the method of dynamic programming [Modelirovanie i optimizatsiya tekhnologicheskikh processov izgotovleniya izdelij s ispol'zovaniem metoda dinamicheskogo programmirovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 61–65. (rus)

18. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E. The problem of optimal scheduling of discrete small-scale production [Problema sostavleniya optimal'nogo raspisaniya diskretnogo melkoserijnogo proizvodstva]. Technical sciences. 2015. No. 2–11. Pp. 2340–2343. (rus)

19. Khaymovich I.N., Frolov M.A., Kuralesova N.O. Improving the process of multiproduct production-based simulation of flexible manufacturing line in the workshop [Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo processa mnogonomenklaturnogo proizvodstva na osnove imitacionnogo modelirovaniya gibkikh proizvodstvennykh linij v cekhe]. Bulletin of the Volga University V.N. Tatishcheva. 2016. Vol. 2. No. 3. Pp. 208–213. (rus)

20. Ushanev K.V. Simulation models of queuing systems of type pa/m/1, h2/m/1 and research on the basis of their quality of service traffic with a complicated structure [Imitacionnye modeli sistemy massovogo obsluzhivaniya tipa pa/m/1, h2/m/1 i issledovanie na ih osnove kachestva obsluzhivaniya trafika so slozhnoj strukturoj]. Control, communication and security systems. 2015. No. 4. Pp. 217–251. (rus)

#### *Information about the authors*

**Duyun, Ivan A.** Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Chuev, Kirill V.** Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 21.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Дуюн И.А., Чуев К.В. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100

#### **For citation:**

Duyun I.A., Chuev K.V. Estimation of the efficiency of flexible production systems and robotic complexes using simulation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100

