

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

3

2022

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

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

№ 3, 2022 год

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

Vol. 3. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки) (до 16.10.2022)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки) (до 16.10.22)

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	16.03.2022
Выход в свет	25.03.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,90. Уч.-изд. л. 13,88. Тираж 40 экз. Заказ № ____

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13 – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences) (to 16.10.2022)
- 05.17.06 – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences) (to 16.10.2022)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	16.03.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Ахмедова Елена Александровна, член-корр. РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).
Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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., и.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Кожухова М.И., Соболев К.Г., Строкова В.В., Кожухова Н.И. ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПМГС ДЛЯ БЕТОНА ПРИ БОРЬБЕ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ	8
Явинский А.В., Чулкова И.Л. ВЛИЯНИЕ ЗОЛЫ ГИДРОУДАЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ	16
Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ	25
Ильина Т.Н., Щедрина Ю.Е., Феоктистов А.Ю., Колесников М.С., Евраев Д.А. ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ТЕРРИТОРИИ СВИНОКОМПЛЕКСА «ОСКОЛЬСКИЙ БЕКОН-3»	32
Закиева Л.Ф. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ	42
Чечель И.Н., Перькова М.В., Дубино А.М., Чечель И.П. РЕКОНСТРУКЦИЯ С ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ЗДАНИЯ КАНЦЕЛЯРИИ И ГОРОДСКОЙ УСАДЬБЫ МИРОВОГО СУДЬИ КУРЧАНИНОВА В БЕЛГОРОДЕ	52
Самойлова Н.В., Кошелева О.Ю., Казанова Н.В. ПРОБЛЕМЫ И СЦЕНАРНЫЕ СТРАТЕГИИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РОСТА ВОЛГОГРАДА В АСПЕКТЕ УСТОЙЧИВОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ	61
Колесникова Л.И., Перькова М.В. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ОХРАНЫ ДЛЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ТИПА «ЖИЛЫЕ ДОМА» – «ДОМ ЖИЛОЙ НА ПОГРЕБАХ» В Г. БЕЛГОРОДЕ	71

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., <u>Рахимбаев И.Ш.</u> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ АЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ	82
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Безмен П.А. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ	89
Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Сеницин Н.Г. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ МАНЖЕТНОГО УПЛОТНЕНИЯ РАБОТАЮЩЕГО БЕЗ СМАЗКИ	103

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Kozhukhova M.I., Sobolev K.G., Strokhova V.V., Kozhukhova N.I. USE OF PMHS-BASED HYDROPHOBIC COATINGS TO FIGHT SLIPPERY CONCRETE TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE	8
Yavinsky A.V., Chulkova I.L. THE EFFECT OF POND ASH ON THE PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE FOR ROAD COVERING	16
Yuriev A.G., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. DISPLACEMENTS IN PIVOTAL SYSTEMS OVER ELASTICITY LIMIT	25
Il'ina T.N., Shhedrina Yu.E., Feoktistov A.Yu., Kolesnikov M.S., Evraev D.A. ABOUT THE ECOLOGICAL SITUATION ON THE TERRITORY OF THE OSKOLSKY BACON-3 PIG COMPLEX	32
Zakieva L.F. DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE OF TERRITORIAL PLACEMENT AND FUNCTIONING OF HEALTHCARE FACILITIES	42
Chechel I.N., Perkova M.V., Dubino A.M., Chechel I.P. RECONSTRUCTION WITH THE ADAPTATION OF THE OBJECT OF CULTURAL HERITAGE OF THE BUILDING OF THE OFFICE AND THE CITY ESTATE OF THE MAGISTRATE KURCHANINOV IN BELGOROD	52
Samoilova N.V., Kosheleva O.Y., Kasanova N.V. PROBLEMS AND SCENARIO STRATEGIES FOR THE URBAN DEVELOPMENT OF VOLGOGRAD IN THE ASPECT OF SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT	61
Kolesnikova L.I., Perkova M.V. FEATURES OF THE DEFINITION OF OBJECTS OF PROTECTION FOR THE OBJECT OF CULTURAL HERITAGE OF THE TYPE "RESIDENTIAL HOUSES" – "RESIDENTIAL HOUSE ON CELLARS" IN BELGOROD	71

CHEMICAL TECHNOLOGY

Rahimbaev Sh.M., Onoprienko N.N., <u>Rahimbaev I.Sh.</u> THERMODYNAMIC ANALYSIS OF HYDRATION PROCESSES OF CALCIUM ALUMINOFERRITES	82
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Bezmen P.A. AN INTEGRATION OF A MOBILE TRACKED ROBOT CONTROL SYSTEM DATA	89
Busarov S.S., Kobylsky R.E., Sinitsin N.G. THEORETICAL RECOMMENDATIONS FOR CHOOSING THE WALL THICKNESS OF A LIP SEAL OPERATING WITHOUT LUBRICATION	103

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-8-15

¹Kozhukhova M.I., ¹Sobolev K.G., ²Strokova V.V., ^{2,*}Kozhukhova N.I.¹University of Wisconsin-Milwaukee²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: kozhukhovanata@yandex.ru

USE OF PMHS-BASED HYDROPHOBIC COATINGS TO FIGHT SLIPPERY CONCRETE TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE

Abstract. The developed hydrophobic complex protective layer based on polymethylhydrosiloxane (PMHS) organosilicons on the top layer of the concrete surface along with hydrophobic characteristics and low ice adhesion strength enable to provide a developed surface roughness that is a direct measure of high traction forces between vehicle tires and road surface pavement, and its applicability in transport infrastructure as one of the anti-icing methods.

Portland cement mortar samples treated with PMHS-based hydrophobic emulsion demonstrated very apparent hydrophobic and icephobic characteristics. The majority of the coated mortar samples reveal over- and superhydrophobicity.

Ice adhesion of the mortars with hydrophobic coatings was 10 times lower in comparison with the reference non-treated hydrophilic samples.

Keywords: anti-icing methods, hydrophobic and icephobic characteristics, ice adhesion, concrete surface roughness.

Introduction. According to statistical reports, the level of road traffic injuries in Russia exceeds all acceptable limits, and the fatality risk as a result of road traffic accidents on the territory of the Russian Federation is one of the highest in the world. About one hundred people die in Russia every day due to road traffic accidents. This is a high rate of accidents giving a relatively low car dependency in the country where the average number of cars per thousand people in Russia is three times less than in Europe and almost four times less than in the United States [1].

At the same time, the annual average number of road accidents with fatality cases due to icy conditions of roads in Russia reaches ten thousand, while in the United States this number would not exceed 480 deaths [2]. Plus, the number of those accidents that resulted in people's physical injuries and material damage is due to the car's loss of control on icy roads. Car accidents are caused due to multiple factors such as exceeding speed limits above 70 km/h on highways and two-lane roads in residential areas, a thin layer of invisible ice as well as intermittent areas of icing on the road pavements, winter precipitation such as snow, freezing rain, drizzle, fog, etc. Most of the road traffic fatalities and serious injuries occur in these conditions especially in the high-risk areas as depicted in Figure 1.

In search of the way to solve this problem on a global scale, many research studies have been conducted for more than a decade and resulted in various methods, materials, and technologies that are proposed to mitigate the issues related to icy slippery roads. The research studies focused on improving the

anti-icing properties of a road surface have been conducted since the 70s of the XX century. Now, there established two fundamental methods for ice control, are physical and physical, and chemical methods. The physical method is based on the increase of anti-icing properties of a surface due to its treatment with various anti-icing compounds. The physical-and-chemical method considers the design of materials with anti-icing properties for building top protective layers of the road surface. Depending on the chosen approach to solve the problem, the research studies are being performed in the frame of one of the methods.

Among the most commonly applied solutions are the following:

Melting ice using heating devices. Despite the cost-effective benefits over mechanical deicing such as chopping off and breaking of ice crust, the method is very energy-intensive. This method of anti-ice control is actively used in factory areas, access roads, and residential areas [3, 4].

Introduction of chemical additives. Among the most common and effective methods of permanent action is the internal introduction of chemical additives which enable the increase of protective characteristics of portland cement concrete and other road surfaces, such as water repellence, frost resistance, and steel reinforcement corrosion control. These additives can be classified as follows:

- finely ground with hydraulic properties or properties of colloidal systems;

- salts of inorganic acids which accelerate the processes of hydration and structure formation of cement concrete;

- additives that increase the hydrophobicity of concrete road surfaces;
- polymer additives that polymerize in concrete [5].

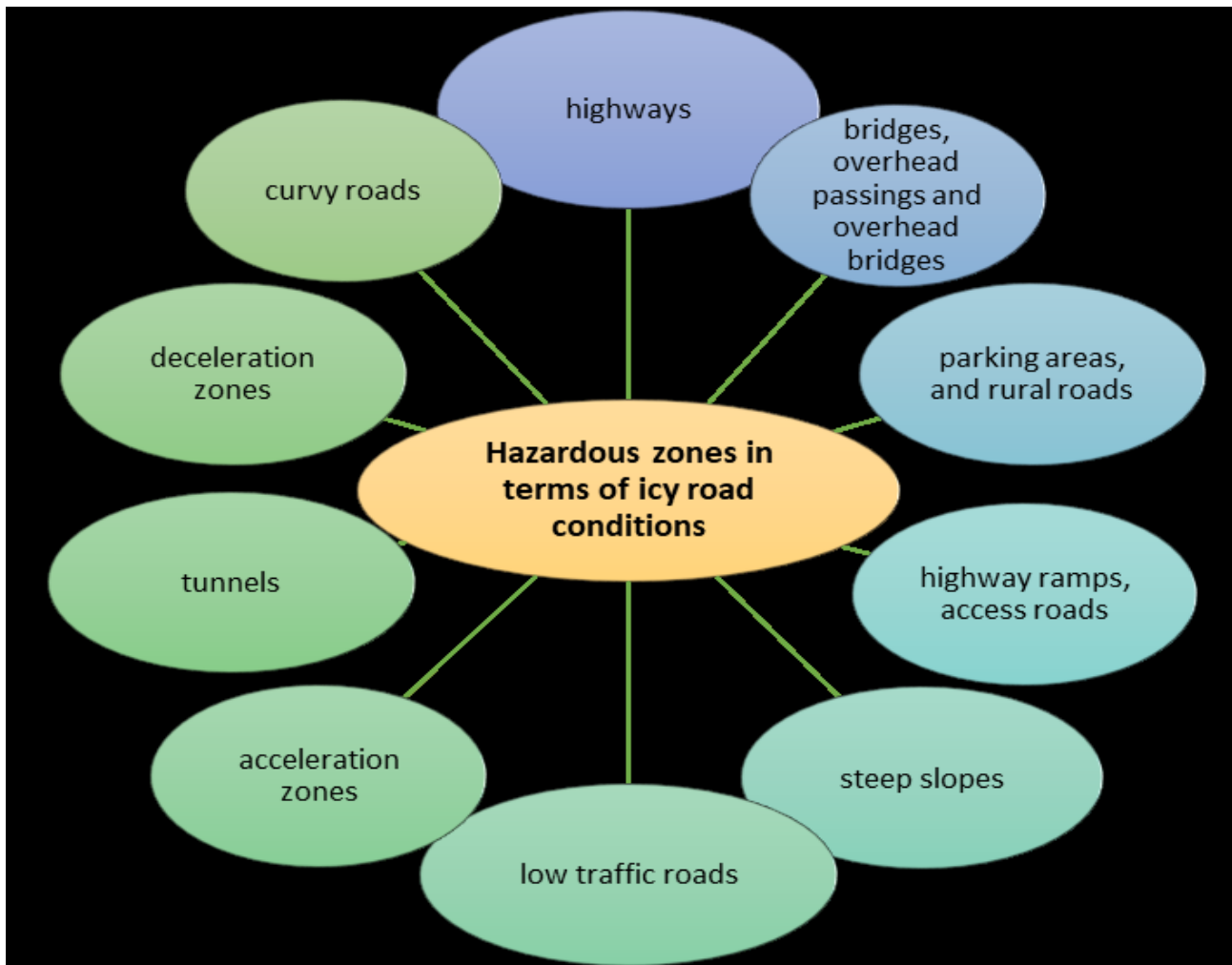


Fig. 1. The high-risk areas with icy road conditions

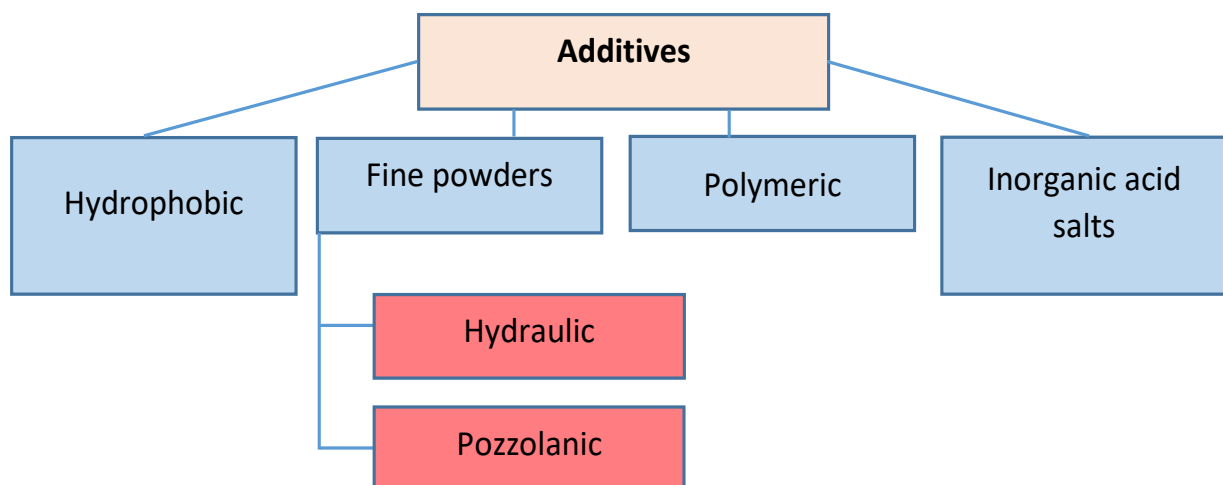


Fig. 2. Types of anti-icing additives

Use of anti-icing coatings. A group of scientists led by Sture Persson and Lars-Orff Anderson [6] suggested the application of vulcanized non-polar rubbers as anti-icing coatings, where the vulcanization

agent consists of sulfur and/or components derived from sulfur or metal oxides. In this case, the anti-icing effect is achieved due to the high deformability

of rubbers which do not allow the formation of ice crust when vehicles are in motion.

The application of pervious asphalt concrete which intended to quickly remove moisture from the pavement and, so reduce the chance for ice formation was one of the proposed technologies [7]. However, the European practice of 1995–96 showed that the technology did not perform as well as was hoped. On the contrary, the field demonstrations with pervious asphalt concrete resulted in the increase of maintenance costs during the winter season by 10–20 %, mainly due to the rapid removal of salts from the asphalt top layer and so, the increased demand for anti-icing agents.

Nowadays, physical-and-chemical method to prevent or remove ice formation has become more widely used. The method suggests making a hydrophobic coating on the surface of a material by introducing chemical additives which reveal water-repelling or hydrophobic properties.

In Switzerland, since 1974, field demonstrations have been carried out when in the composition of the top layer of fine-grained asphalt-concrete pavement was added 5 % of a special multicomponent anti-icing additive "Verglimit". The additive was composed of 80 % calcium chloride and 5 % sodium hydroxide as active agents [8, 9]. These pilot concrete pavements were placed in two areas, the carriageways and bridges in Switzerland, Austria, Germany, the USA, and France. The test results demonstrated significant benefits associated with maintenance labor and costs compared to conventional coatings. The pilot pavements had a reduced adhesion of snow and ice deposits to the applied anti-icing coating.

Earlier, the authors of this article proposed a complex coating based on PMHS compound applied over a specially engineered Portland cement concrete top layer that is enabled to provide superior hydrophobic properties to concrete surfaces [10–12]. Some wetting properties of the proposed complex hydrophobic coating such as contact angle and roll-off angle have been studied [12, 13].

The ice adhesion properties of the developed complex hydrophobic coatings were studied in this research work to evaluate icephobicity of the level of traction between vehicle tire and surface of concrete pavement as a factor of applicability of the proposed anti-icing method in concrete transportation infrastructure.

Materials and methods. Portland cement Type I supplied by LafargeHolcim (USA), as well as CEM I 42.5 N (Russia) were used to produce cement mortars as a top protective layer. Standard fractionated quartz sand with an average particle size of 425 microns and quartz sand from the Vyazenskoye deposit (Russia) was used as a fine aggregate to produce ce-

ment mortar samples. Polyvinyl alcohol (PVA) fibers with a diameter of 1 micron and length of 12 mm were used as a fibrous fine component to provide additional roughness on the surface of the cement mortars.

Polyvinyl alcohol in powder form (PVA) was used as an emulsifier for the production of hydrophobic oil in water emulsion. The procedure for emulsion preparation has been described in [10, 12].

Two analogous organosilicon compounds Polymethylhydrosiloxane produced by Dow Corning in the USA and by Silan in Russia were used as active hydrophobic agents. Also, silica fume and metakaolin were used as fine mineral fillers in the hydrophobic emulsion. Wetting properties as well as icephobic (anti-icing) characteristics of the prepared mortar samples treated with the complex hydrophobic PMHS emulsion were evaluated by measuring contact angle and roll-off angle in the "water-solid-air" interface and the adhesion shear strength within the contact area of hydrophobic coating and ice using the goniometric system (Kruss DSA-100) and the force sensor PASCO CI-6746, respectively.

Experimental Results. In order to evaluate adhesion properties of a hydrophobic coating on the mortars surface to ice layer, the mortar samples treated with the developed complex hydrophobic PMHS emulsion were prepared, determined as optimal compositions based on the contact angle (CA) and the roll-off angle (ROA) test results [12–14]. To estimate the effectiveness of the complex hydrophobic PMHS coatings in assessing wetting properties, 30 mortar compositions were prepared with and without PVA fiber in the matrix as depicted in Table 1. The samples were divided into 3 series for further testing. Mortar samples from the first set were reference mortars (M1-M10). The second set of the samples was treated with the hydrophobic complex emulsion that contained 5 % PMHS as an active hydrophobic component (M1/5-M10/5) and the third set of the samples were treated with the emulsion containing 25 % of PMHS compound (M1/25-M10/25).

According to the previously obtained data [12, 13], the highest values of hydrophobicity were revealed by the mortars treated with a siloxane emulsion containing 5 % of the active PMHS hydrophobic component.

The contact angle values of water droplets on the surface of the mortar samples were in the range of 140–156° and that indicated over- and superhydrophobicity of the studied coatings.

Correlation between the wettability characteristics and the strength of ice adhesion on the surface of hydrophobic mortar samples.

To assess the icephobic characteristics of the developed hydrophobic protective layer of cement

mortars, ten mixes of mortar compositions with and without PVA fibers were tested for ice adhesion strength to the surface of mortar samples by applying shear stress to an ice layer using the force sensor PASCO CI-67461 device, according to the method described in [15, 16]. The tests were performed for reference mortar samples, as well as those treated with 5 % and 25 % hydrophobic PMHS emulsion. The test results are graphically presented in Figure 3.

The shear stress data demonstrate a significant decrease in ice adhesion strength relative to the surface of mortar samples treated hydrophobic coating regardless of whether the samples contain PVA fibers or not. The ice strength adhesion for the mortar samples with coatings was 10 times lower than untreated reference mortar samples.

It should be noted that in the series of mortar samples treated with hydrophobic PMHS emulsion, the shear strength values were higher for the fiber-reinforced mortars in comparison with the non-reinforced samples and the difference between the values was 28 % and 2 % for the mortar samples treated with the emulsions containing 5 % and 25 % PMHS component, respectively. The higher values of ice adhesion observed for the fiber-reinforced mortars are justified by the greater roughness that PVA fibers have created on the surface of the mortar samples, with this creating topographical obstacle that requires greater stress to apply for ice to slide over the surface.

Table 1

Mix design and wetting properties of the mortars

Mortars ID	W/C ratio	C/S ratio	PVC fiber, %	Contact angle, degree	Roll-off angle, degree
M1	0.25	—	1	9	—
M2		1	1	12	—
M3		0.5	1	0	—
M4		0.4	1	0	—
M5		0.33	1	25	—
M6		—	—	13	—
M7		1	—	15	—
M8		0.5	—	1	—
M9		0.4	—	0	—
M10		0.33	—	0	—
M1/5		—	1	146	3
M2/5		1	1	148	2
M3/5		0.5	1	156	5
M4/5		0.4	1	131	8
M5/5		0.33	1	127	14
M6-5		—	—	146	8
M7/5		1	—	144	15
M8/5		0.5	—	146	21
M9/5		0.4	—	141	27
M10/5		0.33	—	139	35
M1/25		—	1	123	—
M2/25		1	1	119	—
M3/25		0.5	1	122	74
M4/25		0.4	1	121	57
M5/25		0.33	1	120	66
M6/25		—	—	116	61
M7/25		1	—	119	60
M8/25		0.5	—	125	62
M9/25		0.4	—	123	64
M10/25		0.33	—	122	68

For the mortar samples treated with the emulsion containing 25 % PMHS component, the ice adhesion values were lower by an average of 27 % vs the mortar samples coated with an emulsion containing 5 % PMHS.

Reduced ice adhesion to the coated top layer of the mortars, in this case, was the result of the thicker hydrophobic layer that the 25 % PMHS emulsion

was enabled to create on the surface of mortar samples, thus covering and reducing its natural and impregnated with PVA fibers roughness of the top mortar layer. This is a similar adhesion effect under shear forces as was observed earlier in this study for the fiber-reinforced and non-reinforced mortar samples, when the roughness of surfaces is much lower, that

enables ice to slide much easier over the smooth hydrophobic surface under shear loading due to the minimal surface roughness. The less the surface roughness, the lower the traction forces between surfaces that arise under horizontal shear loads. Taking into account the applicability of these protective hydrophobic coatings for concrete in road construction, the surface roughness is a fundamental factor as it

has a direct correlation to the degree of traction forces of a vehicle tire to the road surface in motion [13, 14]. In this regard, the lower roughness characteristics and lower ice adhesion strength values of the mortar samples treated with 25 % PMHS emulsion, having a smoother surface, will indicate lower traction forces of a vehicle tire against the road surface pavement.

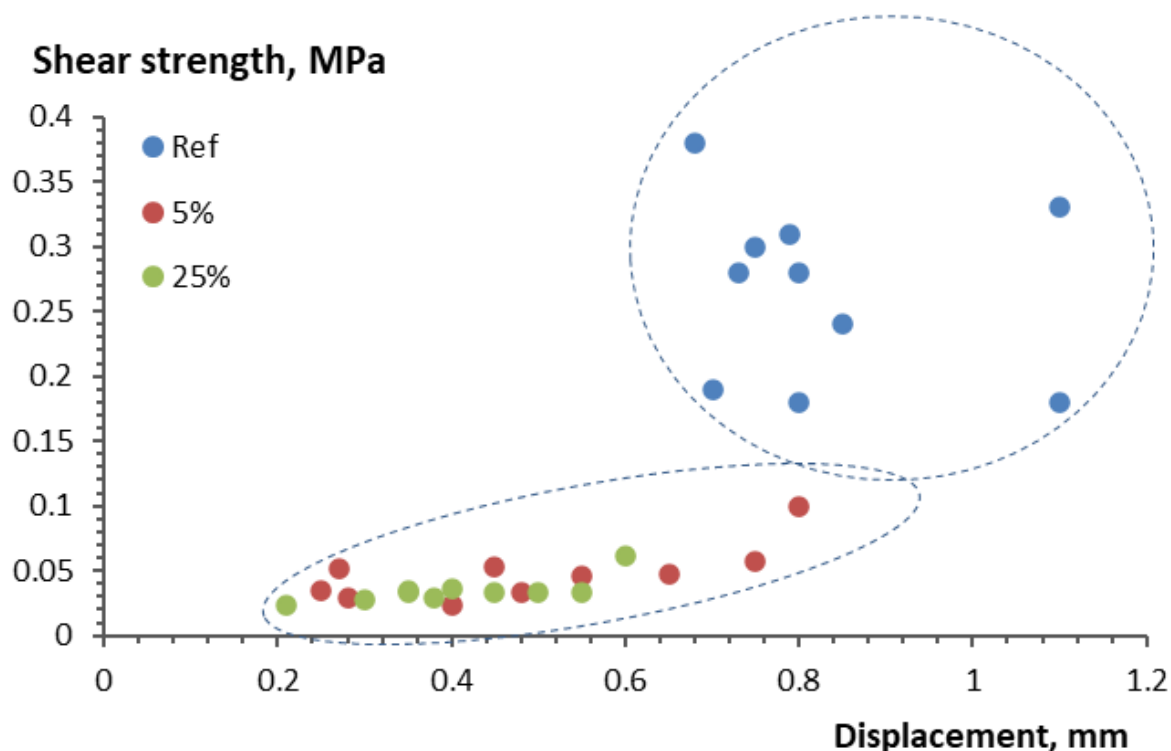


Fig. 3. Correlation between horizontal ice displacement over the surface of mortar samples and ice shear strength

At the same time, hydrophobic coatings produced by treatment of the mortar surface layer with 5 % PMHS emulsion provides low adhesion of ice crust on the protective hydrophobic surface of mortar samples, which enables an anti-icing (ice-phobic) effect. The developed complex hydrophobic coatings also retain a highly developed surface roughness and, so the higher traction forces between vehicle tires and road surface pavement, which defined their applicability in concrete transport infrastructure as one of the anti-icing methods.

Conclusions. The developed protective complex hydrophobic coating based on PMHS compounds for concrete surface application demonstrated the effectiveness in mitigating ice adhesion, which is a critical factor when applied to the safety of roadways in the winter season.

Mortar samples treated with hydrophobic PMHS emulsion demonstrated very apparent hydrophobic and icephobic characteristics. The majority of the coated mortar samples reveal over- and superhydrophobicity.

Ice adhesion of the mortars with hydrophobic coatings was 10 times lower in comparison with the reference non-treated hydrophilic mortar samples.

Samples reinforced with PVA fibers and treated with 5 % PMHS hydrophobic coatings demonstrated a good balance of high hydrophobicity and low ice adhesion to the mortar surface layer while retaining moderate traction forces when horizontal shear loads were applied.

Mortar samples, with and without PVA fiber-reinforcement treated with 25 % PMHS hydrophobic emulsion showed minimal ice adhesion values and minimal traction effect, while the hydrophobic characteristics were 15–20 % lower than those for the mortar samples treated with 5 % PMHS emulsion.

Funding. This work was realized in the framework of the implementation of the Scholarship of the President of the Russian Federation. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V. G. Shukhov.

REFERENCES

1. Analytical review "Comparative analysis of accidents on the roads of Russia and the United States." [Analiticheskiy obzor «Sravnitel'nyy analiz proisshestviy na dorogakh Rossii i SSHA»]. Moscow: Interregional Community Center 2007. 12 p.
2. Icy Road Safety. URL: www.icyroad-safety.com (date of treatment: 03/15/2014).
3. Methods for protecting roads from icing [Metody zashchity dorog ot obledeneniya]. URL: http://www.vinokna.ru/stat/1766_stat.html. (date of treatment: 20.02.2014). (rus)
4. Blackburn R.R., Bauer K.M., Amsler D.E., Boselly S.E., McElroy A.D. Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods. NCHRP REPORT 526. Transportation Research Board, 2004.
5. Doroshenko Yu.M., Doroshenko A.Yu. Organosilicon additives - effective modifiers of cement concrete for road surfacing [Kremniyorganicheskiye dobavki - effektivnyye modifikatory tsementobetona dlya dorozhnykh pokrytiy]. Concrete and reinforced concrete. 2013. No. 1(8). Pp. 56–60. (rus)
6. Sture Persson, Lars – Orff Anderson. Anti-icing coating. Patent No 2086601. MPK C 09 K 3/18, 1997. No. 22.
7. Verburg D.J. Voorkomen is beter dan gemzen. Otvar. 1997. Vol. 82. No. 9. Pp. 322–323.
8. Anti-icing of road surfaces in winter. Construction and operation of roads: Foreign experience [Bor'ba s obledeneniem pokrytiya dorog v zimneye vremya. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya dorog: Zarubezhnyy opyt]. Moscow: Express information TsBNTI of the Ministry of Avtodor of the RSFSR, 1981. Issue No 2. Pp. 8–10. (rus)
9. Dupuis I., Hussain N. Glatteishemmender Strassenbelag anf der Umfahrungsstrasse von Valangin. Strasse und Verkehr. 1977. Vol. 63. No 4.
10. Kozhukhova M.I., Flores-Vivian I., Rao S., Strokov V.V., Sobolev K.G. Complex siloxane coating for superhydrophobization of concrete surfaces [Kompleksnoye siloksanovoye pokrytiye dlya supergidrofobizatsii betonnykh poverkhnostey]. Stroitel'nye Materialy. 2014. No. 3. Pp. 26–30. (rus)
11. Hejazi V., Sobolev K., Nosonovsky M. From superhydrophobicity to icephobicity: forces and interaction analysis. Scientific reports. 2013. Vol. 3(1). Pp 1-6.
12. Flores-Vivian I., Hejazi V., Kozhukhova M.I., Nosonovsky M., Sobolev K. Self-assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete. ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. Vol. 5(24). Pp 13284-13294.
13. Kozhukhova M.I., Strokov V.V., Sobolev K.S. Features of hydrophobization of fine-grained concrete surfaces [Osobennosti gidrofobizatsii melkozernistyykh betonnykh poverkhnostey]. Bulletin of STU named after V.G. Shukhov. 2014. No 4. Pp. 33-35.
14. Sobolev K., Nosonovsky M., Krupenkin T., Flores-Vivian I., Rao S., Kozhukhova M., Hejazi V., Muzenski S., Bosch B., Rivero R. Anti-Icing and De-Icing Superhydrophobic Concrete to Improve the Safety on Critical Elements on Roadway Pavements. CFIRE report, 2013. 54 p.
15. Lanka S., Alexandrova E., Kozhukhova M., Hasan M.S., Nosonovsky M., Sobolev K. Tribological and wetting properties of TiO₂ based hydrophobic coatings for ceramics. Journal of Tribology. 2019. Vol. 141(10) No. 101301 <https://doi.org/10.1115/1.4044178>
16. Ramachandran R., Kozhukhova M., Sobolev K., Nosonovsky M. Anti-icing superhydrophobic surfaces: Controlling entropic molecular interactions to design novel icephobic concrete. Entropy. 2016. Vol. 18(4). No 132. <https://doi.org/10.3390/e18040132>

Информация об авторах

Kozhukhova, Marina I. PhD, Adjunct Professor at University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Civil&Environmental Engineering. E-mail: kozuhovamarina@yandex.ru. University of Wisconsin-Milwaukee. 3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA.

Sobolev, Konstantin G. PhD, Professor at University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Civil&Environmental Engineering. E-mail: k.sobolev@gmail.com. University of Wisconsin-Milwaukee. 3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA.

Strokov, Valeria V. PhD, Professor, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: vvstrokov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Kozhukhova, Natalia I. PhD, assistant professor, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: kozuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 16.12.2021

¹Кожухова М.И., ¹Соболев К.Г., ²Строкова В.В., ^{2,*}Кожухова Н.И.

¹Университет Висконсин-Милуоки

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПМГС ДЛЯ БЕТОНА ПРИ БОРЬБЕ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Аннотация. Разработанное гидрофобное комплексное защитное покрытие на основе кремнийорганических соединений полиметилгидросилоксана (ПМГС), используемое в качестве поверхностного слоя для цементобетона обладает не только гидрофобными и льдофобными характеристиками, но также позволяет обеспечить развитую шероховатость поверхности, которая является основным показателем высоких значений силы сцепления между шинами автомобиля и верхним слоем дорожного покрытия. Это объясняет эффективность его применения в транспортной инфраструктуре как один из методов борьбы с обледенением. Образцы цементобетонной растворной смеси, обработанные гидрофобной эмульсией на основе ПМГС, продемонстрировали довольно высокие гидрофобные и льдофобные характеристики. Большинство образцов цементобетонных растворов с защитным покрытием проявляют сверх- и супергидрофобность.

Выявлено, что адгезия льда к цементобетонной поверхности с гидрофобным покрытием демонстрирует показатели в 10 раз ниже по сравнению с аналогичными значениями для эталонных необработанных образцов с гидрофильными свойствами.

Ключевые слова: методы защиты от обледенения, гидрофобные и льдофобные характеристики, ледяная адгезия, шероховатость бетонной поверхности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналитический обзор «Сравнительный анализ происшествий на дорогах России и США». Москва: Межрегиональный общественный Центр, 2007. 12 с.
2. Icy Road Safety [Электронный ресурс]. URL: www.icyroadsafety.com (дата обращения: 15.03.2014)
3. Методы защиты дорог от обледенения [Электронный ресурс]. URL: http://www.vinokna.ru/stat/1766_stat.html. (дата обращения: 20.02.2014).
4. Robert R. Blackburn, Karin M. Bauer, Duane E. Amsler, S. Edward Boselly, Dean McElroy A. Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods. NCHRP REPORT 526. Transportation Research Board, 2004.
5. Дорошенко Ю.М., Дорошенко А.Ю., Кремнийорганические добавки – эффективные модификаторы цементного бетона покрытия дорог // Бетон и железобетон. 2013. № 1(8). С. 56–60
6. Пат. 2086601, ФРГ, МПК С 09 К 3/18. Противообледенительное покрытие / Стуре Перссон, Ларс–Орф Андерсон; заявитель и патентобладатель Скега Актиеболаг. № 5052955/04; заявл. 1991.11.15; опубл. 1997.08.10, № 22
7. Verburg D.J. Voorkomen is beter dan gemzen // Otar. 1997. Vol. 82. № 9. Pp. 322–323.
8. Борьба с обледенением покрытия дорог в зимнее время. Строительство и эксплуатация дорог: Зарубежный опыт. М.: Экспресс информация ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. 1981. Вып. № 2. С. 8–10.
9. Dupuis I., Hussain N. Glatteishemmender Strassenbelag anf der Umfahrungsstrasse von Val-angin // Strasse und Verkehr. 1977. Vol. 63. № 4.
10. Кожухова М.И., Флорес-Вивиан И., Рао С., Строкова В.В., Соболев К.Г. Комплексное силоксановое покрытие для супергидрофобизации бетонных поверхностей // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 26–30.
11. Hejazi V., Sobolev K., Nosonovsky M. From superhydrophobicity to icephobicity: forces and interaction analysis // Scientific reports. 2013. Vol 3(1). Pp. 1–6.
12. Flores-Vivian I., Hejazi V., Kozhukhova M.I., Nosonovsky M., Sobolev K. Self-assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete // ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. Vol 5(24). Pp. 13284–13294.
13. Кожухова М.И., Строкова В.В., Соболев К.С. Особенности гидрофобизации мелкозернистых бетонных поверхностей // БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 33–35.
14. Sobolev K., Nosonovsky M., Krupenkin T., Flores-Vivian I., Rao S., Kozhukhova M., Hejazi V., Muzenski S., Bosch B., Rivero R. Anti-Icing and De-Icing Superhydrophobic Concrete to Improve the Safety on Critical Elements on Roadway Pavements. CFIRE report, 2013. 54 pp.

15.Lanka S., Alexandrova E., Kozhukhova M., Hasan M.S., Nosonovsky M., Sobolev K. Tribological and wetting properties of TiO₂ based hydrophobic coatings for ceramics // Journal of Tribology. 2019. Vol. 141(10). № 101301 <https://doi.org/10.1115/1.4044178>

16.Ramachandran R., Kozhukhova M., Sobolev K., Nosonovsky M. Anti-icing superhydrophobic surfaces: Controlling entropic molecular interactions to design novel icephobic concrete // Entropy. 2016. Vol. 18(4). № 132 <https://doi.org/10.3390/e18040132>

Information about the authors

Кожухова Марина Ивановна, кандидат технических наук, адъюнкт профессор Университета Висконсин-Милуоки; кафедра гражданского строительства и охраны окружающей среды; кафедра инжиниринга и математических наук. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин. P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США.

Соболев Константин Геннадьевич, PhD, профессор, Университет Висконсин-Милуоки; кафедра гражданского строительства и охраны окружающей среды; Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин, США. E-mail: k.sobolev@gmail.com. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин. P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: vvestroкова@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.12.2021 г.

© Кожухова М.И., Соболев К.Г., Строкова В.В., Кожухова Н.И., 2022

Для цитирования:

Кожухова М.И., Соболев К.Г., Строкова В.В., Кожухова Н.И. Применение гидрофобных покрытий на основе ПМГС для бетона при борьбе с обледенением в дорожно-транспортной инфраструктуре // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-8-15

For citation:

Kozhukhova M.I., Sobolev K.G., Strokhova V.V., Kozhukhova N.I. Use of PMHS-based hydrophobic coatings to fight slippery concrete transportation infrastructure. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 2. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-8-15

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-16-24

**Явинский А.В., Чулкова И.Л.*

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

**E-mail: 121qqz@mail.ru*

ВЛИЯНИЕ ЗОЛЫ ГИДРОУДАЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Аннотация. Цементобетонное дорожное покрытие отличается значительной долговечностью по сравнению с другими. Однако вследствие высоких затрат при строительстве не пользуется популярностью на территории России. Для снижения затрат при строительстве цементобетонного дорожного покрытия предлагается заменить часть цемента, либо часть цемента и песка одновременно в равных пропорциях золой гидроудаления. В работе приведены данные испытаний тяжелого бетона с золой гидроудаления при различных концепциях замены компонентов (замена 10 % цемента; 7,5 % цемента и 7,5 % песка одновременно). Изучено влияние золы гидроудаления ТЭЦ-4 г. Омска на следующие свойства тяжелого бетона: прочность, водопоглощение, плотность, морозостойкость, истираемость. Показано, что введение золы гидроудаления может положительно влиять на прочность тяжелого бетона при поздних сроках твердения (90 и 180 суток). Проведен рентгенографический анализ тяжелого бетона с золой гидроудаления и контрольного беззолного образца. Установлено, что при введении золы гидроудаления в тяжелый бетон, протекает пуццоланическая реакция, продуктом которой являются гидросиликаты кальция. Образование гидросиликатов кальция положительно влияет на свойства тяжелого бетона. Использование золы гидроудаления в качестве компонента тяжелого бетона позволяет снизить его стоимость, а также улучшить экологическую обстановку как в регионе, так и в целом в стране.

Ключевые слова: цемент, тяжелый бетон, зола гидроудаления, прочность, рентгенофазовый анализ, дорожное покрытие.

Введение. Для строительства автомобильных дорог требуется большое количество дорожно-строительных материалов – песка, щебня, цемента, но во многих регионах наблюдается острый дефицит ресурсов необходимых для строительства [1]. При строительстве одного километра дороги расходуется более 4000 м³ бетона. В Омской области в ближайшем будущем планируется строительство трех новых дорог, а также предполагается осуществить реконструкцию и ремонт существующих семнадцати дорог.

Строительство дорог с цементобетонным покрытием не нашло популярности в России, в отличие от многих других стран [2]. Одной из причин неиспользования цементного бетона является значительно более высокая стоимость вяжущего для цементобетонного покрытия по сравнению с асфальтобетоном. Для снижения стоимости строительства цементобетонных дорог необходимо снизить расход цемента. Снижение стоимости строительства цементобетонных дорог без потери качества может значительно повысить интерес инвесторов к этой теме.

В то же время в городе Омске хранится более 150 млн тонн золошлаковых отходов, которые могут использоваться в качестве компонента бетонной смеси, в том числе как замена части вяжущего. Значительное количество накопленных за многие годы золошлаковых отходов хранится на отвалах омских ТЭЦ-2, ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5, которые занимают более 900 га территории [3]. Также

в 2021 году разрабатывается проект расширения площади золоотвала ТЭЦ-5. Накопленные золошлаковые отходы несут высокую угрозу для экологии региона. Постоянные пыления с поверхности отвалов загрязняют атмосферу, а вымывание токсичных элементов золошлаковых отходов осадками и талыми водами негативно влияют на близлежащие к отвалам водоемы и подземные источники воды [4]. Утилизация золошлаковых отходов является важным источником получения высококачественных строительных материалов со сниженной стоимостью.

Следовательно, переработка золошлаковых отходов омских ТЭЦ может позволить комплексно решить сразу нескольких проблем. К ним относятся экономия материальных и природных ресурсов, снижение стоимости дорожного строительства и улучшение экологической ситуации в регионе.

Изучением переработки золошлаковых отходов тепловых электростанций в строительной отрасли активно занимаются многие российские и зарубежные ученые. В работе [5] изучались особенности твердения золоцементных вяжущих. Авторами [6] исследовалось влияние вещественного состава заполнителя из отходов теплоэнергетических установок на свойства газобетона. В статье [7] были приведены исследования использования золы для модификации дорожного битумного вяжущего. Исследование

свойств бетона с золой гидроудаления посвящены многие зарубежные статьи [8–12]. В работах [13–15] изучалось применение золы гидроудаления в качестве мелкого заполнителя в бетоне. Статьи [16, 17] посвящены изучению свойств бетона с заменой части цемента золой гидроудаления. Большая часть представленных исследований позволила получать изделия с использованием золы, не уступающие качеством, а в чем-то превосходящие беззолые аналоги.

Использование золошлаковых отходов в составе тяжелого бетона для строительства цементобетонных дорог предполагает прогнозировать

экономический эффект и улучшение экологической обстановки.

В представленной работе проводилось изучение поведения ультракислой золы гидроудаления различных концентраций в составе тяжелого бетона.

Материалы и методы. В представленном исследовании было изучено влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона при различных концепциях замены компонентов. Для изучения была отобрана зола гидроудаления с ТЭЦ-4 города Омска, химический состав которой представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав золы гидроудаления

Материал	Содержание оксидов, % по массе								
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п.
Зола гидроудаления ТЭЦ-4	60,5	5,6	22,5	2,5	1,2	0,2	0,3	1,9	5,3

По химическому составу золы гидроудаления можно сделать вывод, что она является ультракислой ($M_0 = 0,07$) и не имеет собственной активности. При отборе проб из золоотвала влажность золы гидроудаления составляла 45 %. Зола использовалась во влажном состоянии. При подборе составов тяжелого бетона количество воды рассчитывалось с учетом влажности золы гидроудаления.

Содержание в золе гидроудаления большого количества Al₂O₃ (22,5 %) и SiO₂ (60,5 %) может стать причиной кристаллизации муллитоподобных соединений [18]. Потери при прокаливании составляют 5,3 %. Это говорит о наличии в золе частиц несгоревшего топлива, что может негативно сказаться на свойствах бетона.

Для определения удельной поверхности золы гидроудаления (зола высушивалась до постоянной массы) использовался прибор ПСХ-12. Удельная поверхность испытуемой золы гидроудаления составила 125...185 м²/кг.

Неоднородность золы гидроудаления может оказывать негативное воздействие на свойства получаемого бетона [19, 20]. Это происходит вследствие наличия в золе агрегированных частиц, которые характеризуются повышенной удельной поверхностью и шероховатостью, что может значительно повысить водопотребность бетонной смеси. Для повышения активности ультракислой золы гидроудаления, усреднения ее удельной поверхности и уменьшения количества агрегированных частиц, она подвергалась помолу. Для помола золы гидроудаления использовалась планетарная мельница, время помола составляло 1 мин. После помола удельная поверхность золы гидроудаления составила 320–350 м²/кг.

В качестве вяжущего для изготовления тяжелого бетона использовался ЦЕМ I – 42,5 Н. Он был испытан и соответствует требованиям ГОСТ 31108-2020. Физико-механические свойства портландцемента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства портландцемента

№ п/п	Характеристика	Среднее значение
1	Плотность, кг/м ³ :	
	-насыпная	1215
	-истинная	3045
2	Удельная поверхность, м ² /кг	320
3	Нормальная густота, %	26
4	Равномерность изменения объема (расширение), мм	0
5	Тонкость помола (проход через сито №008), %	97,4
6	Сроки схватывания, мин:	
	-начало	130
	-конец	200
7	Прочность образцов при сжатии в 28 суток, МПа	42,7
8	Прочность образцов при изгибе в 28 суток, МПа	7,15

В составе тяжелого бетона использовались песок I класса и щебень фракции 5–20 удовлетворяющие всем требованиям ГОСТ 8736-2014 и ГОСТ 32703-2014.

Для получения информации о фазовом составе бетонов был проведен рентгенофазовый анализ (РФА).

Прочность бетона определяют по ГОСТ 10180-2012 с помощью гидравлического пресса ТП-1-1500.

Водопоглощение и плотность тяжелого бетона определялись по ГОСТ 12730.3-2020.

Истираемость бетона определялась по ГОСТ 13087-2018 с помощью круга истирания ЛКИ-3.

Морозостойкость тяжелого бетона испытывалась по ускоренному методу с использованием хлорида натрия по ГОСТ 10060-2012.

Основная часть. Выбор рационального количества ультраактивной золы гидроудаления в составе тяжелого бетона проводился в работе [3]. После чего были рассчитаны составы с тяжелого бетона с золой гидроудаления, которые представлены в таблице 3.

Таблица 3

Составы тяжелого бетона на 1 м³

№ Состав	Цемент, кг	Зола гидроудаления, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, кг
1	454	-	621	1020	131
2*	409	45	621	1020	131
3**	420	81	574	1020	144

Примечание:

* - состав с заменой 10 % цемента золой гидроудаления

** - состав с заменой 7,5 % песка и 7,5 % цемента одновременно

Из представленных составов были изготовлены образцы-кубы 10×10×10 см и 7×7×7 см. Твердение образцов протекало в камере нормаль-

ного твердения, после 28 суток они были испытаны. Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний составов тяжелого бетона

Свойства бетона	№ Состав		
	1	2	3
Прочность при сжатии R ₂₈ , МПа	38,9	36,3	35,6
Прочность при сжатии R ₉₀ , МПа	43,5	46,2	45,3
Прочность при сжатии R ₁₈₀ , МПа	46,1	51,8	49,2
Морозостойкость, циклы	300	300	300
Водопоглощение максимальное, W _{max} , %	3,0	2,3	2,4
Плотность, кг/м ³	2209	2247	2230
Истираемость, г/см ²	0,7	0,6	0,7

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что составы с заменой компонентов золой гидроудаления (составы № 2 и № 3) в возрасте 28 суток имеют эксплуатационные свойства не хуже, чем контрольный беззолый состав. Небольшое снижение прочности составов № 2 и № 3, в сравнении с контрольным составом может быть связано с наличием микропористости и рыхлого строения агрегированных частиц в золе гидроудаления. На более поздних сроках твердения (90 и 180 суток) прочность составов с золой гидроудаления становится выше, чем у состава № 1. Это может быть следствием прохождения пуццоланической реакции золы гидроудаления, в ходе которой образуются гидросиликаты кальция.

В ходе пуццоланической реакции, образующиеся при гидратации портландцемента гидроксиды кальция, расходуются для образования нерастворимых соединений C-S-H. Образующиеся

дополнительные гидросиликаты кальция положительно влияют на прочность образцов. Пуццоланическая реакция начинается в первые две недели твердения, но ее основная часть приходится на более поздние сроки твердения.

Также повышение прочности составов № 2 и № 3 в возрасте 90 и 180 суток может быть связано с тем, что пористые частицы золы гидроудаления удерживают в себе воду, которая способна прореагировать с частицами цемента при более поздних сроках твердения. Вследствие чего и наблюдается повышение прочности у образцов № 2 и № 3 по сравнению с контрольным в возрасте 90 и 180 суток.

Для получения информации о фазовом составе (качественном и количественном) бетонов с золой гидроудаления (состав № 2) и контрольного беззолного состава был проведен рентгенофазовый анализ. Для проведения РФА анализа проводился отбор проб тяжелого бетона после

прохождения им испытания на прочность при сжатии. Из испытанных образцов были удалены частицы крупного заполнителя, а оставшийся затвердевший цементно-песчаный раствор подвергался измельчению в агатовой ступке. Для отбора пробы использовалось сито № 008. Далее полученный порошок равномерным слоем помещали в кювету и выравнивали до краев. Съемка рентгеновской дифрактограммы была выполнена на порошковом рентгеновском дифрактометре D8

Advance, фирмы “Bruker” (Германия) в монохроматизированном $\text{Cu-K}\alpha$ излучении (длина волны 0.15418 нм). Использованы следующие режимы измерения: шаг сканирования – 0.02° , время накопления сигнала 3 сек/точке, напряжение и ток накала 40 kV и 40 mA, соответственно, диапазон сканирования $5\text{--}80^\circ 2\Theta$. Результаты рентгенофазового анализа представлены на рисунках 1 и 2.

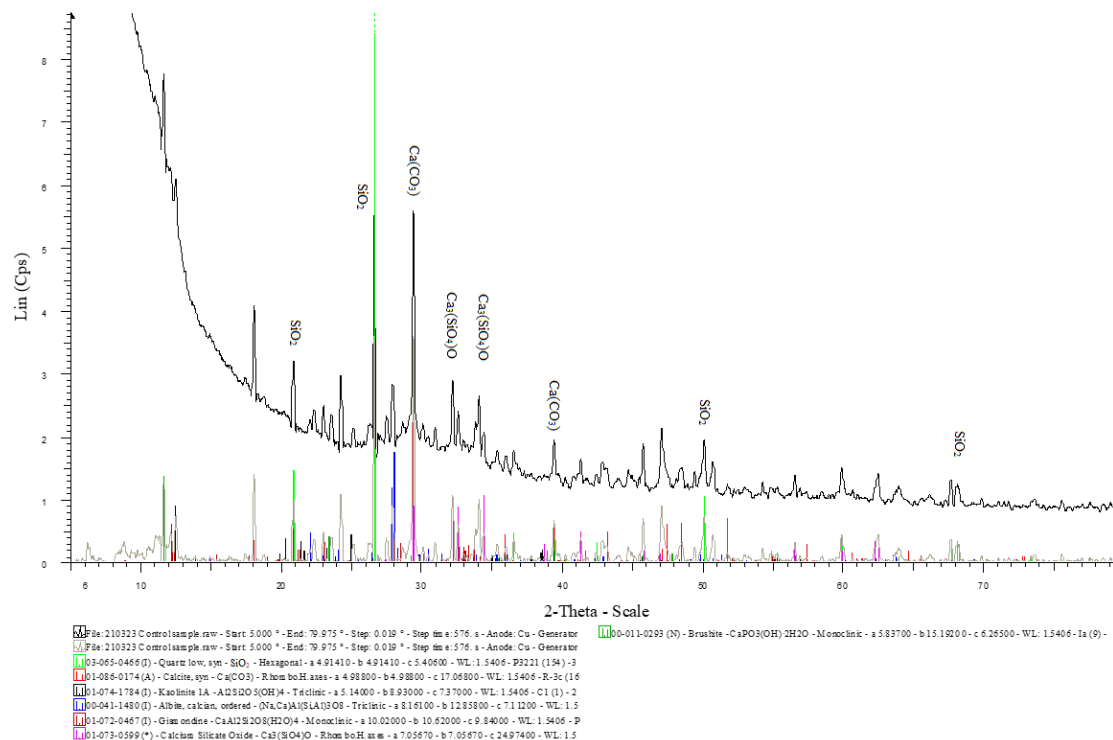


Рис. 1. Рентгенограмма контрольного образца

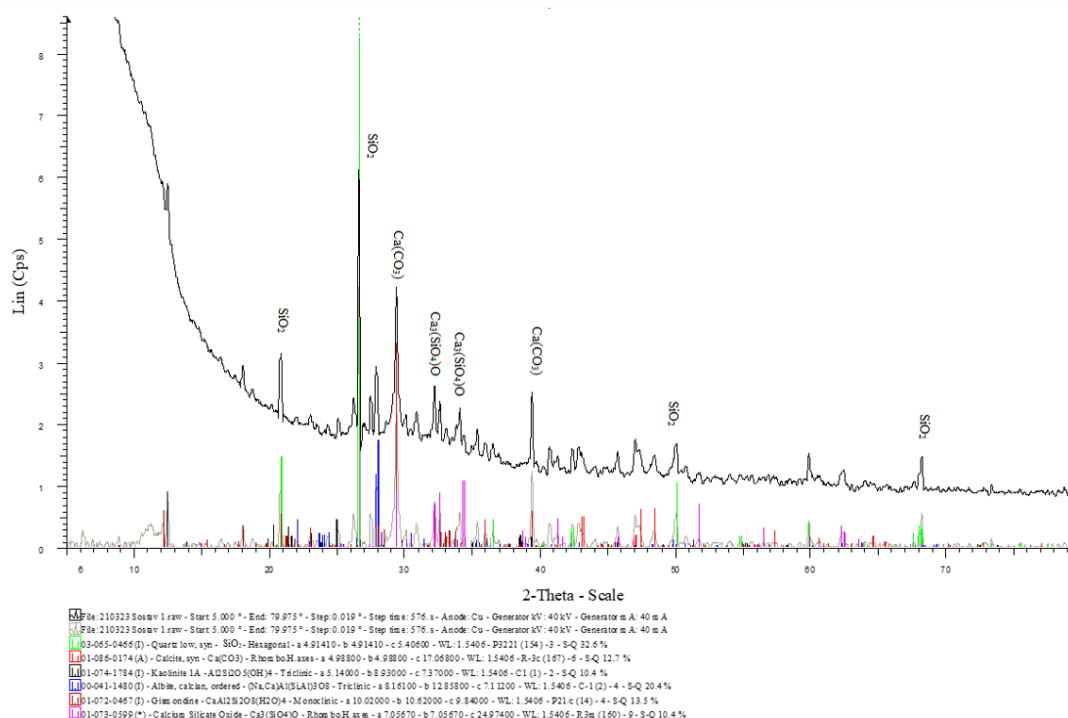
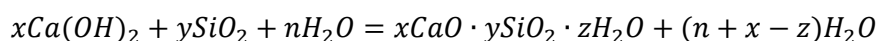


Рис. 2. Рентгенограмма состава с заменой 10 % цемента золой гидротермального

Уменьшение количества свободного Ca^{2+} связано с его переходом в гидросиликаты кальция при взаимодействии с ультракислой золой гидроудаления. По результатам РФА анализа



Полученные рентгенограммы образцов свидетельствуют о повышенном количестве гидросиликатов кальция в составе с золой гидроудаления (состав № 2), по сравнению с контрольным составом. Также по рентгенограммам видно, что у состава с золой гидроудаления уменьшилось количество карбоната кальция, что подтверждает связывание кремнеземом гидроксида кальция и образование более прочных соединений.

Повышение плотности составов с золой гидроудаления может являться следствием заполнения золой и продуктами взаимодействия золы с минералами портландцемента капиллярных промежутков. Зола гидроудаления способствует формированию более плотной структуры межзернового пространства в бетоне, что может быть следствием повышенной степени гидратации цемента, а также образованием дополнительного количества геля из гидросиликата кальция.

Понижение водопоглощения тяжелых бетонов с золой гидроудаления (составов № 2 и № 3) по сравнению с контрольным беззолым образцом свидетельствует об уменьшении пористости этих составов по всему объему образца.

При испытании на истираемость результаты составов № 2 и № 3 и контрольного беззольного образца не показали значимых отличий. Все запроектированные составы показали марку по истираемости G1, что говорит о возможности использования такого бетона для строительства дорожного покрытия цементобетонных дорог.

Морозостойкость образцов определялась по ускоренному методу с применением 5 % раствора хлорида натрия. Все составы успешно прошли испытания, что говорит о возможности получения тяжелого бетона с золой гидроудаления с маркой по морозостойкости до F300 включительно.

Важно подчеркнуть, что при замене части компонентов тяжелого бетона золой гидроудаления снижается его стоимость. Так при замене 10 % цемента золой гидроудаления, можно получить снижение стоимости до 410 рублей за м^3 тяжелого бетона с учетом цен на цемент на период 2021 года. Экономический эффект при использовании состава с заменой 7,5 % цемента и 7,5 % песка составляет 320 рублей за м^3 тяжелого бетона с учетом цен на цемент и песок на период 2021 года.

видно, что тяжелый бетон с заменой части цемента золой гидроудаления (состав № 2) характеризуется сниженным содержанием гидроксида кальция. Это связано с результатом взаимодействия:

При строительстве цементобетонных дорожных покрытий требуется более 4000 м^3 тяжелого бетона на 1 км протяженности дороги. При строительстве 1 км дороги с цементобетонным покрытием при замене 10 % цемента золой гидроудаления можно утилизировать около 181 тонна золы. Ежегодно ТЭЦ города Омска отправляют в отвалы около 2,0 млн тонн золы гидроудаления, что негативно сказывается на экологической обстановке. Строительство дорожного покрытия из предложенных составов тяжелого бетона с заменой компонентов золой гидроудаления позволит полностью утилизировать ежегодно вырабатываемую золу гидроудаления, а также уменьшить площади золоотвалов.

Закключение. Проведение рентгенофазового анализа состава с заменой 10 % цемента золой гидроудаления и контрольного образца подтвердили в зольных составах протекание пуццоланической реакции. Уменьшение количества гидроксидов кальция связано с их переходом в гидросиликаты кальция при взаимодействии с ультракислой золой гидроудаления. Из чего можно сделать вывод, что в тяжелых бетонах с золой гидроудаления образуются гидросиликаты кальция, которые увеличивают прочность, снижают пористость и водопоглощение изделий из них.

В ходе работы было изучено влияние ультракислой золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона с различными концепциями замены компонентов (в первом случае – замена 10 % цемента золой гидроудаления; во втором случае – замена 7,5 % цемента и 7,5 % песка одновременно). Установлено, что введение в состав тяжелого бетона ультракислой золы гидроудаления (с удельной поверхностью 320–350 $\text{м}^2/\text{кг}$) при различных концепциях замены компонентов, способствует более интенсивному набору прочности при длительных сроках твердения (более 28 суток) по сравнению с контрольным беззолым образцом (повышение до 10 %). Это свидетельствует о пуццолановой активности, которую проявляет зола гидроудаления при механоактивации в мельнице.

Разработанные составы тяжелого бетона с золой гидроудаления показывают показатели по плотности выше, чем контрольный беззолый состав, так при прохождении пуццоланической реакции механоактивированной золы гидроуда-

ления образуются дополнительные гидросиликаты кальция, за счет которых и повышается плотность образцов. Также составы с золой гидроудаления имеют пониженное водопоглощение, вследствие заполнения золой и продуктами взаимодействия золы с минералами портландцемента капиллярных промежутков. Повышенная плотность и сниженное водопоглощение образцов с золой гидроудаления являются косвенными признаками снижения пористости образцов. Сниженная пористость образцов благоприятно сказывается на морозостойкости, вследствие чего спроектированные составы с золой гидроудаления соответствуют марке по морозостойкости до F300 и могут применяться в климатических условиях Западной Сибири.

Использование в качестве компонента тяжелого бетона золы гидроудаления при любой концепции замены компонентов дает не только положительный технологический эффект, который выражается в улучшении свойств получаемых изделий, но также позволяет получить ощутимый эколого-экономический эффект. Применение золы гидроудаления при строительстве дорожного полотна позволит уменьшить стоимость строительных материалов и снизит негативный эффект, оказываемый золоотвалами на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Муртазаев С.Ю., Сайдумов М.С., Ахмед А.А., Оцоков К.А. Бетоны для дорожного строительства с применением техногенных материалов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2019. С. 103–112.
2. Саркисян Д.А., Сиordia Д.Т. Технология строительства автомобильных дорог в России и Германии // Академическая публицистика. 2018. №. 2. С. 16–25.
3. Явинский А.В., Чулкова И.Л. Исследование физико-механических свойств тяжелого бетона с золой гидроудаления // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2021. С. 671–675.
4. Трофимов Б.Я., Бутакова М.Д., Федосеев А.В. Влияние комплексной добавки "Зола и поликарбонатный суперпластификатор" на свойства и структуру цементного камня // Строительство и экология: теория, практика, инновации. Сборник докладов I Международной научно-практической конференции. Челябинск: ПИРС, 2015. С. 178–183.
5. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Ковалева И.А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // Вестник МГСУ. Москва, 2015. №11. С. 101–109
6. Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Бердов Г.И., Сыромясов В.А., Дружинин М.С. Влияние вещественного состава заполнителя из отходов сжигания топлива на формирование ячеистой структуры газозолобетона // Строительные материалы. 2014. № 12. С. 42–45.
7. Лебедев М.С., Строкова В.В., Потапова И.Ю., Котлярский Э.В. Влияние добавок низкокальциевой золы-уноса ТЭС на характеристики дорожного битумного вяжущего // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 8–11.
8. Golla S.Y., Rajesh K., Khan M.I., Rahul C., Pruthvi K. Structural performance of exterior beam-column joint using biochar impregnated pond ash concrete // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 39. Pp. 467–471. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.722
9. Thyagaraj K.J., Aravindan S., Fazal A.E. Utilization of pond ash and stone dust as mineral fillers in polymer modified bituminous concrete mix // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. Vol. 12. No. 02. Pp. 785–793. doi: 10.34218/IJARET.12.2.2021.079
10. Yimam Y. A., Warati G. K., Fantu T., Paramasivam V., Selvaraj S. K. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46. No. 17. Pp. 8296–8302. doi:10.1016/j.matpr.2021.03.258
11. Deshmukh R., Patel S., Kapdnis S., Kumawat S., Kulkarni D., Patil N. Effective utilization of construction and demolition waste, pond ash in combination with geosynthetics in flexible road pavement // Environmental Geotechnology. Springer, Singapore. 2019. Pp. 123–131. doi: 10.1007/978-981-13-7010-6_11
12. Harle S.M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete // International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication. 2019. Vol. 7. No. 3. Pp. 12–20.
13. Bhangale P.P., Nemade P.M. Study of Pond ASH (BTPS) Use as A Fine Aggregate in Cement Concrete-Case Study // Int J Latest Trends Eng Technol. 2013. Vol. 2. Pp. 292–297.
14. Arumugam K., Ilango R., Manohar D.J. A study on characterization and use of pond ash as fine aggregate in concrete // International Journal of Civil & Structural Engineering. 2011. Vol. 2. No. 2. Pp. 466–474.

15. Ganesh B., Bai H.S., Nagendra R., Narendra B.K. Characterisation of pond ash as fine aggregate in concrete // Proceedings of International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering 2012. Vol. 21. 119.

16. Jung S., Kwon S. J. Engineering properties of cement mortar with pond ash in South Korea as construction materials: from waste to concrete // Open Engineering. 2013. Vol. 3. No. 3. Pp. 522–533.

17. Srikanth A., Nandini K.A., Babu Y.A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. Vol. 1112. No. 1. Pp. 1–6. doi:10.1088/1757-899X/1112/1/012029

18. Федюк Р.С., Таскин А.В., Гребенюк И.В., Ёлкин О.И. Применение золошлаковых отходов тэц в качестве наполнителя цементных вяжущих

// XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Дни науки–2019». Посвящается 150-летию открытия периодического закона ДИ Менделеевым: Материалы конференции. Озерск, 17–20 апреля 2019 г. Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ. 2019. С. 67–71.

19. Shen P., Zheng H., Lu J., Poon C. S. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength pervious concrete // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 174. Pp. 105. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105736

20. Patel S.K., Satpathy H.P., Nayak A.N., Mohanty C.R. Utilization of fly ash cenosphere for production of sustainable lightweight concrete // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2020. Vol. 101. No. 1. Pp. 179–194. doi:10.1007/s40030-019-00415-6.

Информация об авторах

Явинский Александр Викторович, аспирант. E-mail: 121qqz@mail.ru. Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Россия, 644080, Омск, проспект Мира, 5.

Чулкова Ирина Львовна, доктор технических наук, профессор кафедры Организация, технологии и материалы в строительстве. E-mail: le5@inbox.ru. Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Россия, 644080, Омск, проспект Мира, 5.

Поступила 22.11.2021 г.

© Явинский А.В., Чулкова И.Л., 2022

***Yavinsky A.V., Chulkova I.L.**

Siberian State Automobile and Highway University

**E-mail: 121qqz@mail.ru*

THE EFFECT OF POND ASH ON THE PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE FOR ROAD COVERING

Abstract. Cement concrete covering is characterized by considerable durability, compared to others. But due to the high construction costs, it is not popular in Russia. To reduce costs in the construction of cement concrete pavement it is proposed to replace part of the cement, or part of the cement and sand in equal proportions simultaneously with pond ash. The paper presents the test data of heavy concrete with pond ash at different concepts of component replacement (replacement of 10% of cement; 7.5 % of cement and 7.5 % of sand). The effect of ash from pond ash of CHPP-4 of Omsk was studied. Omsk on the following properties of heavy concrete: strength, water absorption, density, frost resistance, abrasion. It was shown that the introduction of pond ash can have a positive effect on the strength of heavy concrete at late hardening periods (90 and 180 days). A radiographic analysis of heavy concrete with pond ash and a control ashless sample was carried out. It was found that at the introduction of pond ash into heavy concrete, pozzolanic reaction takes place, the product of which are calcium hydrosilicates. The formation of calcium hydrosilicates has a positive effect on the properties of heavy concrete. The use of pond ash as a component of heavy concrete reduces its cost and improves the environmental situation in the country.

Keywords: cement, heavy concrete, pond ash, strength, X-ray phase analysis, road covering.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Gridchin A.M., Murtazaev S.Y., Saidumov M.S., Ahmed A.A., Otsokov K.A. Concretes for road construction using man-made materials [Betony dlya dorozhnogo stroitelstva s

primeneniem tekhnogennykh materialov]. Prirodopodobnye tekhnologii stroitelnykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka: II Mezhdunarodnyj onlajn-kongress, posvyashchennyj 30-letiyu kafedry Stroitel'nogo materialovedeniya,

izdelij i konstrukcij. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2019. Pp. 103–112. (rus)

2. Sarkisyan D.A., Siordia D.T. Technology of Road Construction in Russia and Germany Academic Publicity. 2018. No. 2. Pp. 16–25. (rus)

3. Iavinsky A.V., Chulkova I.L. Study of physical and mechanical properties of heavy concrete with ash from hydro dump [Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv tyazhelogo betona s zolozhidrootvala] Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitelstvo: Sbornik materialov IV Nacionalnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2021. Pp. 671–675.

4. Trofimov B.Y., Butakova M.D., Fedoseev A.V. Effect of the complex additive "Ash and polycarboxylate superplasticizer" on the properties and structure of cement stone [Vliyanie kompleksnoj dobavki "Zola i polikarboksilatnyj superplastifikator" na svoystva i strukturu cementnogo kamnya]. Stroitel'stvo i ekologiya: teoriya, praktika, innovacii. Sbornik dokladov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Chelyabinsk: PIRS, 2015. Pp. 178–183. (rus)

5. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Zagorodniuk L.H., Kovaleva I.A., Powder concretes with the use of anthropogenic raw materials [Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogennogo syrya]. MSCU Bulletin. Moscow, 2015. No 11, Pp. 101–109 (rus)

6. Stolboushkin A.Y., Ivanov A.I., Berdov G.I., Syromyasov V.A., Druzhinin M.S. Effect of the material composition of aggregate from fuel waste on the formation of the cellular structure of gas ash concrete [Vliyanie veshchestvennogo sostava zapolnitelya iz othodov szhiganiya topliva na formirovanie yacheistoy struktury gazozolobetona]. Stroitelnye materialy. 2014. No. 12. Pp. 42–45. (rus)

7. Lebedev M.S., Stokova V.V., Potapova I.Yu., Kotlyarsky E.V. Effect of additives of low-calcium fly ash from TPP on the characteristics of road bituminous binder [Vliyanie dobavok nizkokal'cievoj zoly-unosa TES na harakteristiki dorozhnogo bitumnogo vyazhushchego]. Stroitel'nye materialy. 2014. No. 11. Pp. 8–11. (rus)

8. Golla S. Y., Rajesh K., Khan M.I., Rahul C., Pruthvi K. Structural performance of exterior beam-column joint using biochar impregnated pond ash concrete. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 39. Pp. 467–471. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.722

9. Thyagaraj K.J., Aravindan S., Fazal A.E. Utilization of pond ash and stone dust as mineral fillers in polymer modified bituminous concrete mix. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. Vol.12. No. 02. Pp 785–793. doi: 10.34218/IJARET.12.2.2021.079

10. Yimam Y. A., Warati G. K., Fantu T., Paramasivam V., Selvaraj S. K. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46. No. 17. Pp 8296–8302. doi:10.1016/j.matpr.2021.03.258

11. Deshmukh R., Patel S., Kapdnis S., Kumawat S., Kulkarni D., Patil N. Effective utilization of construction and demolition waste, pond ash in combination with geosynthetics in flexible road pavement. Environmental Geotechnology. Springer, Singapore, 2019. Pp. 123–131. doi: 10.1007/978-981-13-7010-6_11

12. Harle S.M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete. International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication. 2019. Vol. 7. No. 3. Pp. 12–20.

13. Bhangale P.P., Nemade P.M. Study of Pond ASH (BTPS) Use as A Fine Aggregate in Cement Concrete-Case Study. Int J Latest Trends Eng Technol. 2013. Vol. 2. Pp. 292–297.

14. Arumugam K., Ilango R., Manohar D. J. A study on characterization and use of pond ash as fine aggregate in concrete. International Journal of Civil & Structural Engineering. 2011. Vol. 2. No. 2. Pp. 466–474.

15. Ganesh B., Bai H.S., Nagendra R., Narendra B.K. Characterisation of pond ash as fine aggregate in concrete. Proceedings of International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering (AARCV 2012). 2012. Vol. 21. Pp. 119.

16. Jung S., Kwon S. J. Engineering properties of cement mortar with pond ash in South Korea as construction materials: from waste to concrete. Open Engineering. 2013. Vol. 3. No. 3. Pp. 522–533.

17. Srikanth A., Nandini K.A., Babu Y.A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. Vol. 1112. No. 1. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/1112/1/012029

18. Feduk R.S., Taskin A.V., Grebenyuk I.V., Yolkin O.I. Application of ash-and-slag wastes from thermal power plants as a cement binding filler [Primenenie zoloshlakovykh othodov tec v kachestve napolnitelya cementnykh vyazhushchih]. XIX All-Russian Scientific and Practical Conference "Days of Science-2019". Dedicated to the 150th anniversary of the discovery of the periodic law by Mendeleev MD: Conference Proceedings. 2019. Pp. 67–71. (rus)

19. Shen P., Zheng H., Lu J., Poon C. S. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength pervious concrete. Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 174. 105. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105736

20. Patel S.K., Satpathy H.P., Nayak A.N., Mohanty C.R. Utilization of fly ash cenosphere for production of sustainable lightweight concrete. Journal

of The Institution of Engineers (India): Series A. 2020. Vol. 101. No. 1. Pp. 179–194. doi:10.1007/s40030-019-00415-6

Information about the authors

Yavinskiy, Aleksandr V. Postgraduate student. E-mail: 121qqz@mail.ru. Siberian State Automobile and Highway University. Russia, 644080, Omsk, prospekt Mira 5.

Chulkova, Irina L. DSc, Professor. E-mail: le5@inbox.ru. Siberian State Automobile and Highway University. Russia, 644080, Omsk, prospekt Mira 5.

Received 22.11.2021

Для цитирования:

Явинский А.В., Чулкова И.Л. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 16–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-16-24

For citation:

Yavinsky A.V., Chulkova I.L. The effect of pond ash on the properties of heavy concrete for road covering. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 16–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-16-24

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31

***Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: yuriev_ag@mail.ru

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ

Аннотация. Одним из положений метода расчета строительных конструкций по предельным состояниям является удовлетворение эксплуатационным требованиям в отношении перемещений их элементов под нагрузкой. Актуальной проблемой является их определение на стадии упруго-пластического деформирования материала. Предложена методика ее решения для случая диаграммы Прандтля. Стержневая система представлена двухпролетной статически неопределимой балкой. Рассмотрены ее предельное состояние по несущей способности, а также промежуточный этап деформирования. Введение приведенного момента позволяет распространить формулу Мора-Максвелла за предел линейной упругости. Использование классических физических моделей механики деформируемого твердого тела приводит к решению проблемы в аналитическом виде. Для проверки теоретических результатов, полученных по предлагаемой методике, были проведены эксперименты. В одном из них испытывалась двухпролетная балка с пролетом 50 см и поперечным сечением $3 \times 0,42$ см из дюралюминия. Предварительно были получены механические характеристики материала. Перемещения измерялись с помощью индикаторов часового типа. Максимальная нагрузка (428 Н) в каждом из пролетов балки составила 80 % от предельной величины. При этом балка имела упруго-пластические области. Эксперимент выявил зависимость перемещений от нагрузки, приемлемую для обеих стадий деформирования: линейный график при законе Гука и кривую при наличии пластических деформаций. Отклонения от теоретических значений составляли не более 3,3 %.

Ключевые слова: стержневая система, статически неопределимая балка, упруго-пластическое состояние материала элемента конструкции, перемещения под нагрузкой.

Введение. Проектирование строительных конструкций в настоящее время основывается на их расчете по методу предельных состояний. Предельным считается состояние, при котором конструкция перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям. Различают две группы предельных состояний. Первая группа квалифицирует непригодность конструкции к эксплуатации по причине потери несущей способности, вторая – нарушение функционирования по таким причинам, как чрезмерные деформации, образование и раскрытие трещин.

Расчет по второй группе предельных состояний содержит условие, чтобы перемещения элементов конструкции под нагрузкой не превышали предельного значения, определяемого нормами. При этом актуальной является проблема определения перемещений элементов строительных конструкций, находящихся в упруго-пластической стадии деформирования [1–13].

Методика исследования. В данной работе решение указанной выше проблемы осуществляется применительно к статически неопределимой балке с учетом выполнения нормативных требований (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*). В основу расчета положена диаграмма Прандтля [14–16], начальный участок ко-

торой свидетельствует о линейно-упругом деформировании материала вплоть до предела текучести σ_y . За ним следует площадка текучести с теоретически неподдающимся ограничением и постоянными деформациями при напряжении σ_y .

Расчет по первой группе предельных состояний ведется при расчетной нагрузке, а по второй – по ее нормативной величине. Исчерпание несущей способности балки сочетается с образованием определенного числа пластических шарниров [17, 18], превращающих геометрически неизменяемую систему в механизм. Из этого условия устанавливается предельная нагрузка. Естественно, при определении перемещений учитывается ее доля, соответствующая нормативной нагрузке. Этот факт имеет формальный характер и не влияет на разработку метода определения перемещений.

Основная часть. В качестве примера примем двухпролетную балку, нагруженную силами F так (рис. 1, а), что наибольший изгибающий момент в пролете оказывается равным его аналогу на опоре (рис. 1, б). В этом случае возможно не поэтапное, а одновременное возникновение трех пластических шарниров, превращающих балку в механизм, что приводит к непосредственной картине упруго-пластического состояния балки в момент потери ее несущей способности.

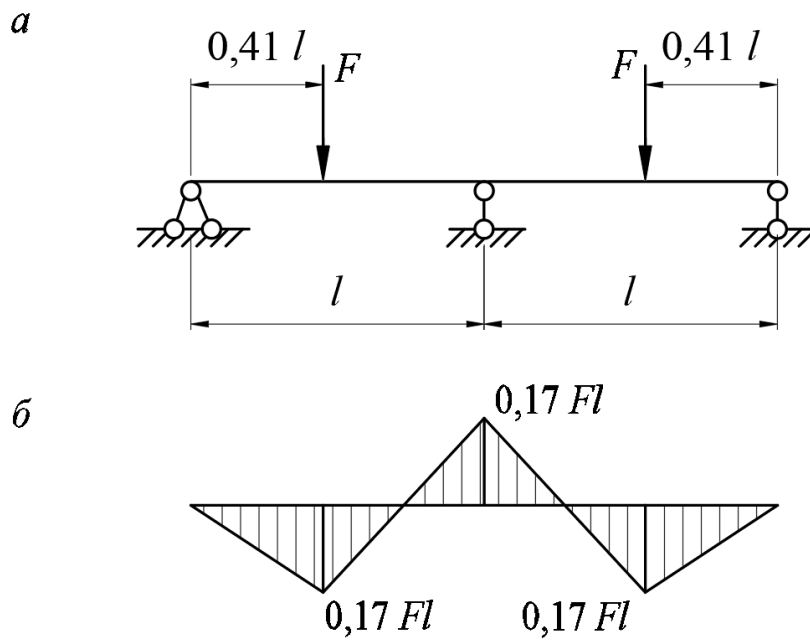


Рис. 1 Двухпролетная балка:
а – расчетная схема, б – эпюра моментов

Для этого состояния представим расчетную схему балки в ином виде (рис. 2, а). На эпюре изгибающих моментов (рис. 2, б) введены обозначения:

$M_{(y)}$ – момент, соответствующий появлению пластических деформаций в крайних волокнах по высоте поперечного сечения балки;

$M_{(y) \lim}$ – предельный момент, соответствующий появлению пластического шарнира.

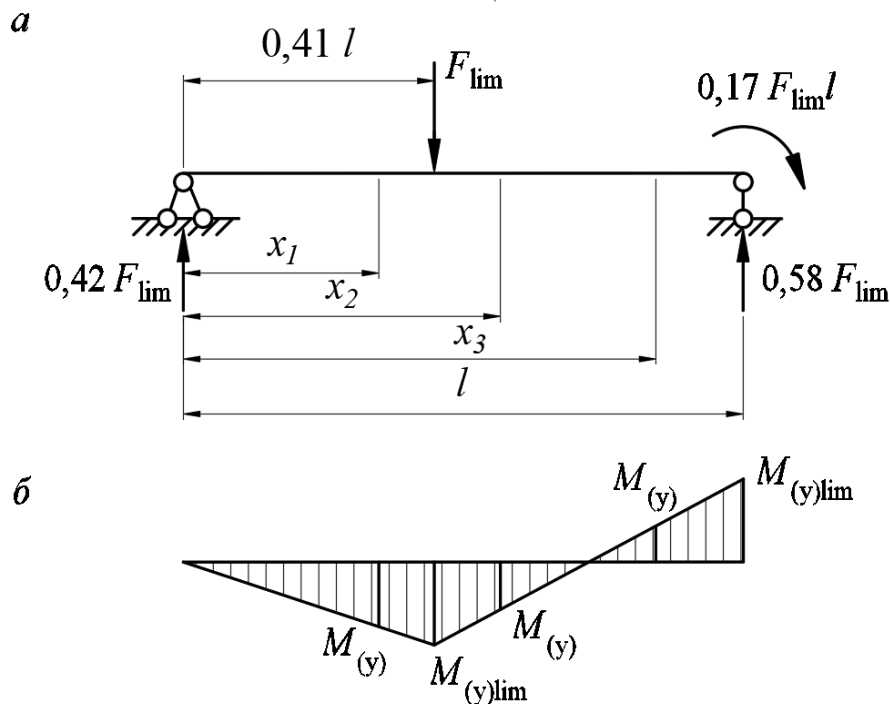


Рис. 2 Левый пролет на рис. 1:
а – расчетная схема, б – эпюра моментов

При этом $M_{(y)} = \sigma_y W = \sigma_y \frac{bh^2}{6}$, а $M_{(y) \lim} = \sigma_y W_{(y)} = \sigma_y \frac{bh^2}{4}$, где b и h – ширина и высота сечения балки, W – момент сопротивления изгибу, $W_{(y)}$ – ее аналог в пластическом шарнире.

Таким образом, $M_{(y) \lim} = 0,17 F_{\lim} l = \frac{1}{4} \sigma_y b h^2$, откуда $F_{\lim} = 1,47 \sigma_y \frac{bh^2}{l}$.

Рассматривая последовательно участки балки с текущими координатами x_1 ($0 \leq x_1 \leq$

$0,41l$), $x_2(0,41l \leq x_2 \leq 0,705l)$, $x_3(0,705l \leq x_3 \leq l)$, из условия $|M| = M_{(y)}$ составляем уравнения для определения координат балки с начальными пластическими деформациями. Для первого участка такое уравнение имеет вид:

$$0,42 \cdot 1,47 \sigma_y \frac{bh^2}{l} x_{1(0)} = \sigma_y \frac{bh^2}{6},$$

откуда $x_{1(0)} = 0,27l$. Аналогично находим $x_{2(0)} = 0,51l$; $x_{3(0)} = 0,9l$.

Таким образом, упруго-пластические области в балке имеют границы: $0,27l \leq x \leq 0,51l$; $0,9l \leq x \leq l$.

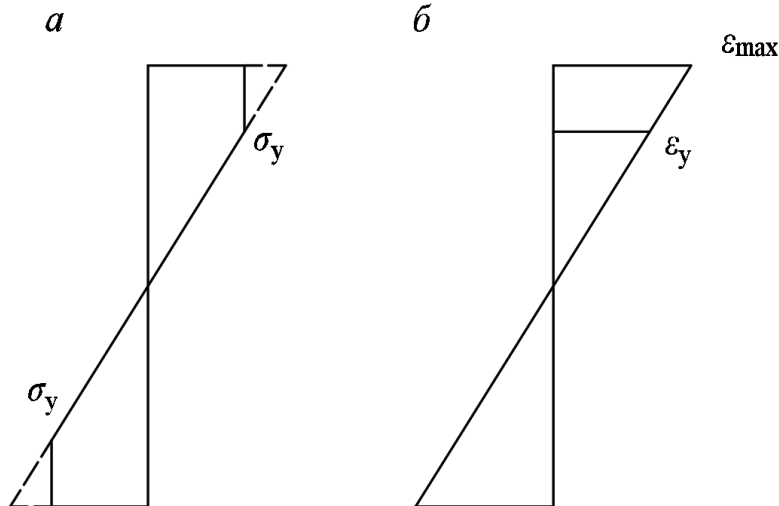


Рис. 3. Эпюра напряжений (а) и деформаций (б) в поперечном сечении

Фактической эпюре напряжений соответствует момент M , а условной эпюре – приведенный момент M_{red} . В данном случае имеем [19]:

$$M_{red} = \frac{M_{(y)}}{\sqrt{3 - \frac{2M}{M_{(y)}}}}. \quad (1)$$

Отсчитывая на каждом участке балки с напряжениями $\sigma > \sigma_y$ локальную координату $\bar{x}$ от большей ординаты M_b в направлении меньшей граничной ординаты M_a , представим уравнение в виде:

$$M = M_b - \frac{M_b - M_a}{l_{loc}} \bar{x}, \quad (2)$$

где l_{loc} – длина участка балки, материал которой находится в упруго-пластическом состоянии.

Выражение (1) принимает вид:

$$M_{red} = \frac{M_{(y)}}{\sqrt{3 - \frac{2}{M_{(y)}} (M_b - \frac{M_b - M_a}{l_{loc}} \bar{x})}}. \quad (3)$$

Для вычисления интегралов в формуле Мора–Максвелла по правилу Верещагина необходимо установить площадь и координату $\bar{x}_c$ центра тяжести эпюры M_{red} .

Известно, что формула Мора–Максвелла для перемещений применяется при линейно-упругих деформациях. Чтобы использовать ее в упруго-пластической стадии деформирования материала, вводится приведенный момент.

По гипотезе плоских сечений эпюре напряжений, показанной на рис. 3, а сплошной линией, соответствует эпюра деформаций на рис. 3, б. Для эпюры напряжений, продолженной штрихами, соответствующей линейно-упругому материалу, эпюра деформаций не изменится.

Площадь эпюры M_{red} равна:

$$\omega = \int_0^{l_{loc}} M_{red} d\bar{x}, \quad (4)$$

статический момент эпюры M_{red} :

$$S = \int_0^{l_{loc}} M_{red} \bar{x} d\bar{x}, \quad (5)$$

расстояние до центра тяжести эпюры M_{red} от большей ординаты – $\bar{x}_0 = \frac{S}{\omega}$. (6)

Балку разбиваем на 6 участков: 1) $0 \leq x \leq 0,27l$; 2) $0,27l \leq x \leq 0,41l$; 3) $0,41l \leq x \leq 0,51l$; 4) $0,51l \leq x \leq 0,705l$; 5) $0,705l \leq x \leq 0,9l$; 6) $0,9l \leq x \leq l$. 1-му, 4-му и 5-му участкам присущи линейно-упругие деформации, 2-й, 3-й и 6-й участки находятся в упруго-пластическом состоянии.

Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае $M_{(y)lim} = 1,5M_y$ и используя формулы (4) – (6), находим для второго участка: $\omega = 0,28M_{(y)}l$; $S = 0,013M_{(y)}l^2$; $\bar{x}_0 = 0,046l$; для 3-го и 6-го участков: $\omega = 0,2M_{(y)}l$; $S = 0,0067M_{(y)}l^2$; $\bar{x}_0 = 0,033l$.

Перемещение в точке K балки определяется по формуле

$$f = \frac{1}{EI} \sum \omega_y, \quad (7)$$

где y – координата эпюры M от единичной силы в точке K , взятая в точке, соответствующей центру тяжести площади ω ;

E – модуль продольной упругости,

I – момент инерции поперечного сечения балки.

Вычислим перемещение в точке приложения силы F , то есть f_F .

В табл. 1 представлены необходимые данные, в том числе указанные значения y с «единичной» эпюры, имеющей вид треугольника с максимальной ординатой $0,242l$.

Таблица 1

Компоненты формулы (7)

№ участка	1	2	3	4	5	6
$\omega, M(y)l$	0,135	0,28	0,2	0,098	-0,098	-0,2
$\bar{x}_0, l$	0,18	0,364	0,443	0,561	0,848	0,967
y, l	0,11	0,21	0,23	0,18	0,07	0,01

В итоге получаем:

$$f_F = \frac{0,128M_{(y)}l^2}{EI}. \quad (8)$$

Полученная формула выражает вертикальное перемещение в момент исчерпания несущей способности конструкции. Расчет по второй группе предельных состояний ведется по нормативной нагрузке, которая в определенной мере меньше ее предельного значения. В этом случае $M_{(y)\lim} \neq 1,5M_{(y)}$, ввиду отсутствия пластических шарниров, и формула (8) имеет другой коэффициент (см. ниже).

Для определения границ упруго-пластических областей остается прежнее условие: $|M| = M_{(y)}$.

Следует отметить, что в расчете не учитывалось влияние поперечных сил, которые по имеющимся данным [20] оказывают не столь значительное влияние на перемещения балки.

Для проверки теоретических формул, полученных по предложенной методике, были проведены эксперименты (рис. 4). В одном из них испытывалась двухпролетная балка из дюралюминия. Предварительно были получены механические характеристики материала:

$$\sigma_y = 343 \text{ МПа}, E = 7,17 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

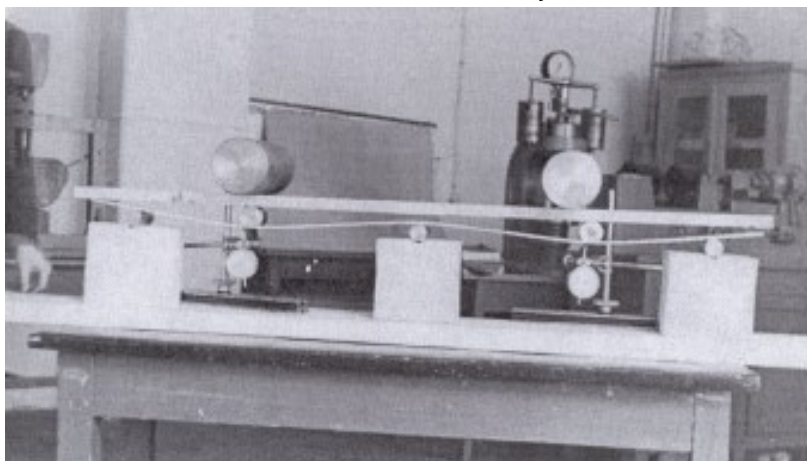


Рис. 4 Экспериментальная установка

Балка имела пролеты $l=50$ см, ширину сечения $b=3$ см, высоту сечения $h=0,42$ см.

Предельная нагрузка определена из уравнения

$$M_{(y)\lim} = 0,17F_{\lim}l = \frac{1}{4}\sigma_ybh^2$$

и составила 534Н.

С учетом того, что момент $M_{(y)}$ равен $\frac{1}{6}\sigma_ybh^2$, то есть в 1,5 раза меньше $M_{(y)\lim}$, его появление в сечении под силой F будет соответствовать нагрузке 356 Н. Интервал нагружения балки находился в пределах от 0 до 428 Н. Балка

имела упруго-пластические области $16,83 \text{ см} \leq x \leq 22,97 \text{ см}$, $47,53 \text{ см} \leq x \leq 50 \text{ см}$. Формула для перемещений имеет вид:

$$f_F = \frac{0,072M_{(y)}l^2}{EI}. \quad (9)$$

С учетом исходных данных, в том числе $M_{(y)}=3025 \text{ Н·см}$, теоретическое значение перемещения при нагрузке 428 Н равно $f_F = 4,1 \text{ см}$.

Эксперимент выявил зависимость $F \sim f$, приемлемую для обеих стадий деформирования материала балки. При нагружении в пределах до

356 Н отклонения от линейного графика составили 1–1,5 % от теоретических значений. В дальнейшем наблюдалось искривление графика в связи с развитием пластических деформаций. При нагрузке 428 Н перемещение составило 3,97 см, что на 3,3 % отличается от теоретического значения.

Выводы. Формула Мора–Максвелла получила распространение на случай упруго-пластических деформаций в элементах конструкции. Теоретические результаты подтверждены экспериментом. Практическое использование методики исследования деформирования несущих конструкций за пределом упругости связано с их расчетом по второму предельному состоянию, что в конечном итоге позволяет определить оптимальные параметры сечений элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев А.С. Исследование работы круглой мембраны при больших прогибах за пределами упругости // Инженерный сборник. М.: АН СССР, 1951. Т.9. С. 99–112.
2. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. М.: ИЛ, 1963. 248 с.
3. Томас Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М.: Мир, 1964. 308 с.
4. Ольшак В., Рыхлевский Я., Урбановский В. Теория пластичности неоднородных тел. М.: Мир, 1964. 156 с.
5. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1969. 380 с.
6. Majid K.I. Non-linear structures. Matrix methods of analysis and design by computers. London: Butterworths, 1972. 343 с.
7. Чирас А.А., Боркаускас А.Э. Каркаускас Р.П. Теория и методы оптимизации упруго-пластических систем. Л.: Стройиздат, 1974. 280 с.
8. Биргер И.А. Общие алгоритмы решения задач теорий упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 51–73.
9. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. В 3-х т. Т.1. М.: Наука, 1975. 832 с.
10. Martin J.B. Plasticity: fundamental and general results. Cambridge: MIT Press, 1975. 931 с.
11. Prathap G., Varadan T.K. The inelastic large deformation of beams // Trans. ASME. 1976. E.43. №4. С. 689–690.
12. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ. 2002. 90 с.
13. Юрьев А.Г., Толбатов А.А., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Рациональные сечения бруса при косом изгибе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №11. С. 60–63.
14. Ленский В.С. Упругость и пластичность. М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. 104 с.
15. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. 390 с.
16. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. М.: Стройиздат, 1978. 205 с.
17. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М.: Госстройиздат. 1954. 287 с.
18. Юрьев А.Г. Решение нелинейных задач строительной механики М.: Изд-во МИСИ, 1977. 128 с.
19. Давидов И.В. Определение перемещений в сжато-изогнутых элементах при их работе за пределом упругости // Труды Харьковского инженерно-строительного института. Вып. 4. 1955. С. 167–182.
20. Ellyin F., Deloin R. The effect of shear on yielding of structural members. Int. J. Solids and Struct. 1972. 8. №3. С. 297–314.

Информация об авторах

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

Смоляго Нина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: Smoliago@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Яковлев Олег Александрович, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: yak-oleg@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.12.2021 г.

© Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А., 2022

*Yuriev A.G., Smolyago N.A., Yakovlev O.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail:yuriev_ag@mail.ru

DISPLACEMENTS IN PIVOTAL SYSTEMS OVER ELASTICITY LIMIT

Abstract. One of the provisions of the method for calculating building structures by the limiting state is the satisfaction of the operational requirements in relation to the displacements of their elements under load. An urgent problem is their determination at the stage of elastic-plastic deformation of the material. A technique is proposed for its solution for the case of the Prandtl diagram. The core system is a two-span statically indeterminate beam. Its limiting state in terms of bearing capacity, as well as an intermediate stage of deformation, are considered. The introduction of the reduced moment makes it possible to extend the Mohr-Maxwell formula beyond the limit of linear elasticity. The use of classical physical models of solid mechanics leads to the solution of the problem in an analytical form. Experiments were carried out to test the theoretical results obtained by the proposed method. In one of them, a two-span beam with a span of 50 cm and a cross section of 3×0.42 cm made of duralumin was tested. The mechanical characteristics of the material were previously obtained. Displacements were measured with the help of indicators. The maximum load (428 N) in each of the spans of the beam was 80 % of the limit value. In this case, the beam had elastic-plastic regions. The experiment revealed the dependence of displacements on the load, acceptable for the form of deformation: a linear graph with Hooke's law and a curve in the presence of plastic deformations. Deviations from theoretical values were no more than 3.3 %.

Keywords: pivotal system, static undefinable beam, elastic-plastic deformation, state of material of construction element, displacements under loading.

REFERENCES

1. Grigoriev A.S. Work research of circular membrane under large deflections over elastic limit [Issledovanie raboty krugloj membrany pri bol'shikh progibakh za predelami uprugosti]. Engineering collection. M.: AN SSSR, 1951. Vol. 9. Pp. 99–112. (rus)
2. Eshelbi J. Continual theory of dislocation [Kontinual'naya teoriya dislokacij]. M.: IL, 1963. 248 p. (rus)
3. Tomas T. Plastic flow and destruction in solids [Plasticheskoe techenie i razrushenie v tverdykh telah]. M: Mir, 1964. 308 p. (rus)
4. Olshak V., Richleky Ya., Urbanovsky V. Plasticity theory of inhomogeneous solids [Teoriya plastichnosti neodnorodnykh tel]. M.: Mir. 1964. 156 p. (rus)
5. Moiseev N.N. Asymptotic methods of non-linear mechanics [Asimptoticheskie metody nelineynoy mekhaniki]. M.: Nauka, 1969. 380 p. (rus)
6. Majid K.I. Non-linear structures. Matrix methods of analysis and design by computers. London: Butterworths, 1972. 343 p.
7. Chiras A.A., Borkauscas A.E., Karkauscas R.P. Theory and methods of optimization of elastic-plastic systems [Teoriya i metody optimizatsii uprugo-plasticheskikh sistem]. L.: Stroyizdat, 1974. 280p. (rus)
8. Birger I.A. Total algorithms of problems solution of elasticity, plasticity and creeping theories [Obshchie algoritmy resheniya zadach teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti]. Successes of deformed mediums mechanics. M.: Nauka, 1975. Pp. 51–73. (rus)
9. Filin A.P. Applied mechanics of deformable solids [Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruемого tela]. In 3 volumes. Vol.1. M.: Nauka, 1975. 832 p. (rus)
10. Martin J.B. Plasticity: fundamental and general results. Cambridge MIT Press, 1975. 931 p.
11. Prathap G., Varadan T.K. The inelastic large deformation of beams. Trans. ASME. 1976. E.43. No4. Pp. 689–690.
12. Yuriev A.G. Variational principles of structure mechanics [Variatsionnye principy stroitel'noy mekhaniki]. Belgorod: Publishing house of BelGTASM. 2002. 90p. (rus)
13. Yuriev A.G., Tolbatov A.A., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. [Ratsional'nye secheniya brusa pri kosom izgibe]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No11. Pp. 60–63. (rus)
14. Lensky V.S. Elasticity and plasticity [Uprugost' i plastichnost']. M.-L.: GITTL, 1950. 104 p. (rus)
15. Sokolovsky V.V. Plasticity theory [Teoriya plastichnosti]. M.: Visshaya shkola, 1969. 390 p. (rus)
16. Lukash P.A. Bases of nonlinear structure mechanics [Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki]. M.: Stroyizdat, 1978. 205p. (rus)
17. Rzhаницin A.R. Structures calculation with regard to plastic properties of materials [Raschet sooruzhenij s uchetom plasticheskikh svoystv materialov]. M.: Gosstroyizdat, 1954. 287 p. (rus)
18. Yuriev A.G. Solution of nonlinear problems of structure mechanics [Reshenie nelineynykh zadach stroitel'noy mekhaniki]. M.: Publishing house of MISI, 1977. 128 p. (rus)

19. Davidov I.V. Definition of displacements in concisely curved elements for their work over elasticity limit [Opredelenie peremeshchenij v szhatykh elementah pri ih rabote za predelom uprugosti]. Works of Kharkov engineering building institute. Ed.4. 1966. Pp. 167–182. (rus)

20. Ellyin F, Deloin R. The effect of shear on yielding of structural members. Int. J. Solids and Struct. 1972. 8. No.3. Pp. 297–314.

Information about the authors

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

Smolyago, Nina A. Ph.D., Assistant professor. E-mail: Smoliago@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yakovlev, Oleg A. Senior lecturer. E-mail: yak-oleg@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 10.12.2021

Для цитирования:

Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 25–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31

For citation:

Yuriev A.G., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. Displacements in pivotal systems over elasticity limit. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 25–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-32-41

¹Ильина Т.Н., ²Щедрина Ю.Е., ¹Феоктистов А.Ю., ¹Колесников М.С., ¹Евраев Д.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Департамент агропромышленного комплекса и воспроизводства окружающей среды
Белгородской области

*E-mail: ilina50@rambler.ru

ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ТЕРРИТОРИИ СВИНОКОМПЛЕКСА «ОСКОЛЬСКИЙ БЕКОН-3»

Аннотация. На примере ООО «АПК «Промагро» составлен перечень биологических препаратов, применяемых на территории Белгородской области для снижения неприятных запахов от навозных стоков. В настоящей работе выполнены замеры содержания вредных веществ и уровня запахов в цехах для откорма свиней и на выбросе вентиляционных шахт корпусов свиноводческого комплекса: концентрации угарного газа (CO), двууглекислого газа (CO₂), оксида азота (NO₂), оксида серы (SO₂), метана (CH₄), сероводорода (H₂S) и аммиака (NH₃), а также уровня запахов на территориях, прилегающих к свинокомплексу. Выполненный расчет рассеивания выбросов вредных и пахучих веществ на территориях (ГОСТ Р 58578-2019 Правила установления нормативов и контроля выбросов в атмосферу), показал необходимость введения деструкторов запаха в ванны приема навозосток. В Белгородской области на различных свиноводческих комплексах применяют следующие биопрепараты деструкторы: «Эмбионик», «Бактофор-3», «Санвит-К», «Санвит-К-форте», «Доктор Робик LGN 050», «УБП Биус», «Экомик Про В». К числу активно применяющих «Бактофор-3» предприятий относится и ООО «АПК «Промагро», определенное в качестве базового. Проведена сравнительная характеристика эффективности препаратов, определены оптимальные концентрации препаратов для введения в ванны навозосток.

Ключевые слова: свинокомплекс, биологические препараты, деструкторы запаха, навозные стоки, лагуны, ольфактометр, газоанализатор.

Введение. Отходы животноводческих хозяйств опасны тем, что в них содержатся, яйца гельминтов (глистов) и патогенные микроорганизмы, являющиеся источником заболеваний. Особенно опасны отходы свиноводческих комплексов. Одна свиноферма на 100 тыс. голов по интенсивности загрязнения воды равнозначна городу с населением 250 тыс. человек. Однако многие проблемы экологического плана в животноводстве еще не решены. Остро стоит вопрос использования накапливающегося навоза и других отходов, особенно на свинофермах. Жидкий навоз получают при бесподстилочном содержании скота на полах со специальным покрытием с ежедневным удалением навоза. Жидкий навоз представляет собой смесь кала, мочи и некоторого количества технологических отходов воды. На фермах крупного рогатого скота воды в нем бывает 92–93 %, на свинофермах – до 97 %. Он имеет хорошую текучесть и может транспортироваться самотеком по трубам, каналам, пневмо- и гидротранспортной системой. Содержание в помещении продуктов обмена веществ организмов животных, бактериальная осемененность воздуха, отрицательно сказывающиеся на здоровье и физиологическом состоянии животных, находятся в прямой зависимости от поголовья стада [1].

Основная часть. Существуют различные способы подготовки жидких отходов для сельскохозяйственного использования, которые заключаются в добавке различных коагулянтов для ускорения отстойных процессов или добавке реагентов для ускорения сбраживания [2, 3]. Навозосток становится безвредным, полезным удобрением и без запаха, после длительного выдерживания от 1 года и до 3-х лет (без запаха более 2-х лет выдерживания). Выявлено, что опасно высокое содержание азота и фосфора с выбросами в воздух аммиака, летучей органики, пыли, загрязнение водоемов (декомпрессия через почву, биоосеменение через атмосферу и т. д.).

Для свинокомплекса «Оскольский бекон-3» объем лагун (при хранении стоков около 6 месяцев) должен составлять не менее 450000 м³/год (оптимально – 500000 м³/год).

Для первого этапа оздоровления проблемной ситуации, без значительных инвестиций на применение техногенных технологий с высокими затратами: энергии, трудозатрат, себестоимости на разделение стоков с отдельной переработкой осадков и фугата; покрытие лагуны крышами, биогазовые и биологические станции и т.д., рекомендуется применение методов комплексной технологии биоремедиации для сокращения карантинирования, обеззараживания и повышения полезности утилизации переработанных стоков на полях; для снижения ореола запахов на

площадках свиногомплекса; уменьшения доли падежа с повышением продуктивности на всех этапах цикла выращивания.

Термин «биоремедиация экосистемы свиногомплексов» в основе использования «Консорциумом» – это микробиологическое комплексное решение острой проблемы навозостокос с использованием живых, полезных микроорганизмов в циклах: опороса, дорашивания, откорма на всем пути обращения навозостокос: образование, сбор, хранение в лагунах, вывоз отходов на поля.

Поступающие из производственных помещений вредные вещества и запахи из лагун свиногомплексов создают экологически неблагоприятную обстановку для прилегающих территорий. Не менее важной является задача очистки вентиляционных выбросов от вредных и пахучих веществ [4–12]. Для улавливания газообразных примесей применяют адсорбционные методы очистки газов, основанные на поглощении примесей пористыми телами-адсорбентами. Процессы очистки проводят в периодических или непрерывных адсорберах. Достоинством методов является высокая степень очистки, а недостатком – невозможность очистки запыленных газов. Перспективными являются каталитические методы очистки, которые основаны на химических превращениях токсичных компонентов в нетоксичные на поверхности твердых катализаторов. Очистке подвергаются газы, не содержащие пыли и катализаторных ядов. Методы используются для очистки газов от оксидов азота, серы, углерода и от органических примесей. Их проводят в реакторах различной конструкции. Как правило эти методы энергозатратны, и разработка способов улавливания и утилизации вредных газов является последующей задачей улучшения экологической обстановки на территориях свиногомплексов.

Цели и задачи. Разработка методологических и технологических принципов биоремедиации экосферы свиногомплексов проводится с целью очистки и обеззараживания навозостокос; снижения выбросов загрязняющих веществ и запахов в атмосферу; повышения эффективности использования (утилизации) навозостокос как органических удобрений с сокращением сроков карантинирования (выдержки) до 4-х месяцев с учетом срока заполнения лагуны (навозосборника).

Исследование технологии биоремедиации в реальных условиях опытно-промышленных испытаний в контрольных производственных корпусах (дорашивание, откорм) исследуемых образцов биопрепаратов на основе использования комплекса штаммов микроорганизмов позволит выявить наиболее эффективные добавки для промышленного использования.

Основной показатель и задача биоремедиации – выявление действия биопрепарата в роли биодеструктора с выбором для широкого практического использования такого синергетического консорциума до 12 видов аэробно-анаэробных факультативных сапрофитных микроорганизмов специально отобранных и адаптивно селекционированных по критерию деструкции сложных органических загрязнений – сертифицированных и прошедших апробацию.

Материалы и методы. Для уничтожения запахов используют биопрепараты деструкторы, которые вводят в лагуны. Проведенный обзор доступных литературных источников показал, что опубликованные результаты исследований имеют отрывочный, не систематизированный характер (в том числе и по Белгородской области), точные данные по дозировкам и способам внесения отсутствуют, что характерно и типично для всех установленных актов по результатам более раннего применения биопрепаратов на 12 свиногомплексах РФ, все акты декларативно-рекламные: «...корка отсутствует, запахи слабые, осадки уменьшены...» – все без абсолютных и относительных величин. Как правило, производители биопрепаратов занимаются непосредственно их производством, не обеспечивая научно-обоснованного их применения, а их реализацией занимаются перекупщики. Способы и дозировку применения рекомендуют «на глазок». Потребители действуют по принципу «меньше внесем – больше сэкономим». В результате происходит снижение эффекта воздействия препарата, а значит увеличение выброса неприятных запахов в окружающую среду.

В настоящей работе проведены исследования параметров микроклимата в цехах производственного комплекса, определены концентрации вредных веществ внутри помещений и поступающих на территорию свиногомплекса, произведен расчет рассеивания вредных выбросов на территориях (ГОСТ Р 58578-2019 Правила установления нормативов и контроля выбросов в атмосферу), представлен сравнительный анализ биопрепаратов-деструкторов, подаваемых в лагуны навозостокос для уменьшения запахов.

В Белгородской области на различных свиноводческих комплексах применяют следующие биопрепараты деструкторы: «Эмбионик» – 1 предприятие, «Бактофор-3» – 5 предприятий, «Санвит-К» – 4 предприятия, «Санвит-К-форте» – 1 предприятие, «Доктор Робик LGN 050» – 1 предприятие, «УБП Биус» – 1 предприятие, «Экомик Про В» – 1 предприятие. Два предприятия не используют биодеструкторов совсем. К числу активно применяющих «Бактофор-3»

предприятий относится и ООО «АПК «ПромАгро», определенное в качестве базового.

На базе свиного комплекса «Оскольский бекон-3» ООО «АПК «ПромАгро» были проведены испытания трех биопрепаратов для снижения выделений запахов в лагунах:

- лагуна №9 применялся препарат «Nonfetor» – истребитель запаха»;

- лагуна №4 – препарат «Санкрит-К-форте» – деструктор запаха»;

- лагуна №3 – препарат «Бактофор-3-лагуна» – деструктор запаха».

В лагунах № 9, №4 – экспозиция выдержки – 31-35 суток, лагуна №3 – исследовалась с выдержкой 31 день с пролонгацией до 60 суток.

Данные из протоколов испытаний, для удобства сравнения, сведены в таблицу №1.

Таблица 1

Таблица сравнительных результатов испытания биопрепаратов

Компоненты	Бактофор-3 лагуна		Nonfetor		Санкрит-К-форте		Примечание
рН	до	после	до	после	до	после	
	7,2	7,5	–	7,5	7,5	7,5	
Доля сух. ост.	1,42	0,9	–	1,04	1,09	1,65	Массовая доля в % на сух. в-во.
Доля золы	29,68	29,63	–	29,94	29,64	22,75	
Доля орг. в-ва	35,16	35,19	–	35,03	35,18	38,63	
N ₂	0,19	0,19	–	0,22	0,22	0,23	% на исх. влажность
P ₂ O ₅	0,07	–	–	0,09	0,09	0,09	
K ₂ O	0,16	–	–	0,19	0,21	0,20	
Свинец	2,68	–	–	3,22	1,89	1,80	Токсичные элементы
Ртуть	0,014	–	–	0,011	0,008	0,010	
Медь	1526,4	–	–	2012,4	1794,1	1308,2	
Кадмий	0,58	–	–	0,8	0,74	0,55	
Мышьяк	0,50	–	–	0,72	0,28	0,47	
Цинк	4020,4	–	–	4901,0	4364,7	3297,9	

Микробиологические показатели у всех трех практически одинаковы:

- БГКП (клеток) – 100/10;
 - энтерококки (стрептококки фекальные) – 100/10;
 - патогенные энтеробактерии – не обнаружены;
 - стафилококки, клостридии (патогенные) и спорообразующие бактерии (рода bacillus) и паразитологические показатели – не обнаружены.

Результаты и обсуждения. Исследования биопрепаратов, вносимых в лагуны, показали:

1. Препарат «Бактофор-3». Эффективность препарата в рекомендованных ранее (до выдачи нами рекомендаций) 9-10 мл концентрата на 1 м³ навозостока незначительна: имелась корка на 2/3 площади зеркала в лагунах; запахи имели место и довольно сильные (по результатам посещения и осмотра лагун в конце июля – начале августа 2020 г. без дополнительного внесения биопрепаратов).

После внесения дополнительных концентраций (доза до 30-35 мл концентрата на 1 м³ – эффективность хорошая по ослаблению запаха (до слабоощутимых), высокая по обеззараживанию за период 30-40 дней карантинирования. Существенный эффект по увеличению в осадке – минеральной составляющей, оксидов токсичных

элементов (зола) с уменьшением органопотенциала осадка, а также снижение содержания азота и фосфора, растворенных токсичных окислов не наблюдается. Инициация перемешиванием применялась. По отношению к двум другим биопрепаратам по эффективности практически сравним с «Санкрит-К-форте» и предпочтительнее «Nonfetor».

2. Препарат «Nonfetor» – истребитель запахов». При ориентировочной дозировке 35–40 мл концентрата на 1 м³ стока запахи истребил до уровня двух других биопрепаратов. Эффективность по запахам у всех трех препаратов одинаковая. Существенно хуже эффективность (по отношению к двум конкурентам) и показатели по токсичным элементам: свинец; ртуть; медь; кадмий; мышьяк; цинк – и это при том, что температурный фактор и дозировка реагента имели преимущество по отношению к «Бактофор-3».

3. Препарат «Санкрит-К-форте». Все показатели сравнимы с «Бактофор-3», но внесение биопрепарата в сухом виде имело существенное преимущество (по активному титру реагента), что, соответственно, отразилось на более лучших показателях по токсичности по отношению к «Бактофор-3» (по меди, цинку, ртути, свинцу и мышьяку).

Доказано, что при повышенных дозировках биодеструкторов (около 35 мл концентрата на 1 м³ навозостока) имеет место высокоэффективное снижение запаха и обеззараживание стоков за короткий период карантинирования до 40–50 дней.

Следует отметить, что актуальной задачей является комплексное исследование отходов АПК с целью их практического использования [12–15], а также применение различных способов утилизации тепла в системах обеспечения технологических параметров микроклимата в производственных помещениях [16, 17].

На основании проведенных поисковых исследований предложено организовать процессы деструкции запахов в помещениях (в ваннах) с пролонгацией эффектов в лагунах.

Для оценки экологической обстановки определяли параметры наружного воздуха вдоль границы предприятия с подветренной стороны блока корпусов, проводили замеры вредных выбросов с последующим составлением карт рассеивания. Определили 12 точек напротив каждого полукорпуса левого крыла (через каждые 15–20 м

вдоль ограждения) на расстоянии 10–15 м от полукорпусов левого крыла.

Для оценки содержания вредных веществ и уровня запахов в помещениях для откорма свиней и на выбросе вентиляционных шахт корпусов свиноводческого комплекса выполнены измерения концентрации угарного газа (CO), двууглекислого газа (CO₂), оксида азота (NO₂), оксида серы (SO₂), метана (CH₄), сероводорода (H₂S) и аммиака (NH₃), для оценки уровня запаха проводились измерения методом разбавления до порогового значения.

Для измерения концентрации газов использовались газоанализаторы СЕАН П-4, для измерения уровня запахов – ольфактометр Nasal Ranger методом разбавления их до порогового значения.

Измерения проводились внутри корпусов (в проходе полукорпуса), вблизи мест забора воздуха приточными клапанами, на выбросе из шахт (на 4 группах шахт на каждом корпусе) и вдоль ближайшей к обследуемым корпусам границы территории предприятия. Средние значения результатов измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений концентрации газов

На высоте 0,3 м				На высоте 1,7 м				На вытяжном камине		
H ₂ S, мг/м ³	NH ₃ , мг/м ³	t, °C	φ, %	H ₂ S, мг/м ³	NH ₃ , мг/м ³	t, °C	φ, %	H ₂ S, мг/м ³	NH ₃ , мг/м ³	t, °C
0,5	4,8	30,3	39,3	0,4	4,8	30,2	36,1	0,5	2,5	29,9

Как видно из таблицы, концентрация сероводорода остается неизменной. Аммиак, как более легкий газ, рассеивается в помещении цеха и на выбросе концентрация снизилась вдвое.

На основании полученных данных, с использованием программ «СЗЗ-Эколог (версия 1.1)» и «УПРЗА Эколог 4.60.8» выполнен расчет рассеивания выбросов вредных и пахучих веществ на территориях, прилегающих к свинокомплексу.

Карты рассеивания приведены на рисунках 1–2.

Допустимые концентрации вредных веществ в помещениях свинокомплексов согласно РД-АПК 1.10.02.04-12 составляют:

- диоксида углерода (CO₂) – не более 0,2 об. %;
- аммиака (NH₃) – не более 20 мг/м³;
- сероводорода (H₂S) – не более 10 мг/м³.

Как видно из табл. 2, с учетом требований ГН 2.2.5.1313-03 (с дополнениями), можно сделать вывод о допустимой концентрации перечисленных веществ в атмосфере помещений.

Следует отметить, что в большей части корпусов выращивания (с 6 по 9 и в 11 и 12), уровень

неприятных запахов превышает предел измерения ольфактометра, что в совокупности со значительными объемами выбрасываемого вытяжного воздуха, загрязненного аммиаком и сероводородом в концентрациях до 10 % ПДК, а аммиаком до 25 % ПДК, может создавать неблагоприятные условия как для проживающих в окрестных населенных пунктах, так и для выращиваемых животных. Представленные карты рассеивания построены на данных замеров только в отдельной части 12 корпусов, без учета выбросов еще 24-х и лагун накопления навозных стоков. Поэтому с уверенностью можно утверждать, что выбросы от свинокомплекса «Оскольский бекон-3» существенно больше и, следовательно, оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Именно поэтому постоянно поступают жалобы не только от жителей расположенного рядом села Хорошилово, но и от жителей г. Старый Оскол. Как видно из рисунка 2, смесь тяжелых газов образует более обширную неблагоприятную зону распространения выбросов вредных и пахучих веществ, по сравнению с аммиаком (см. рис. 1).

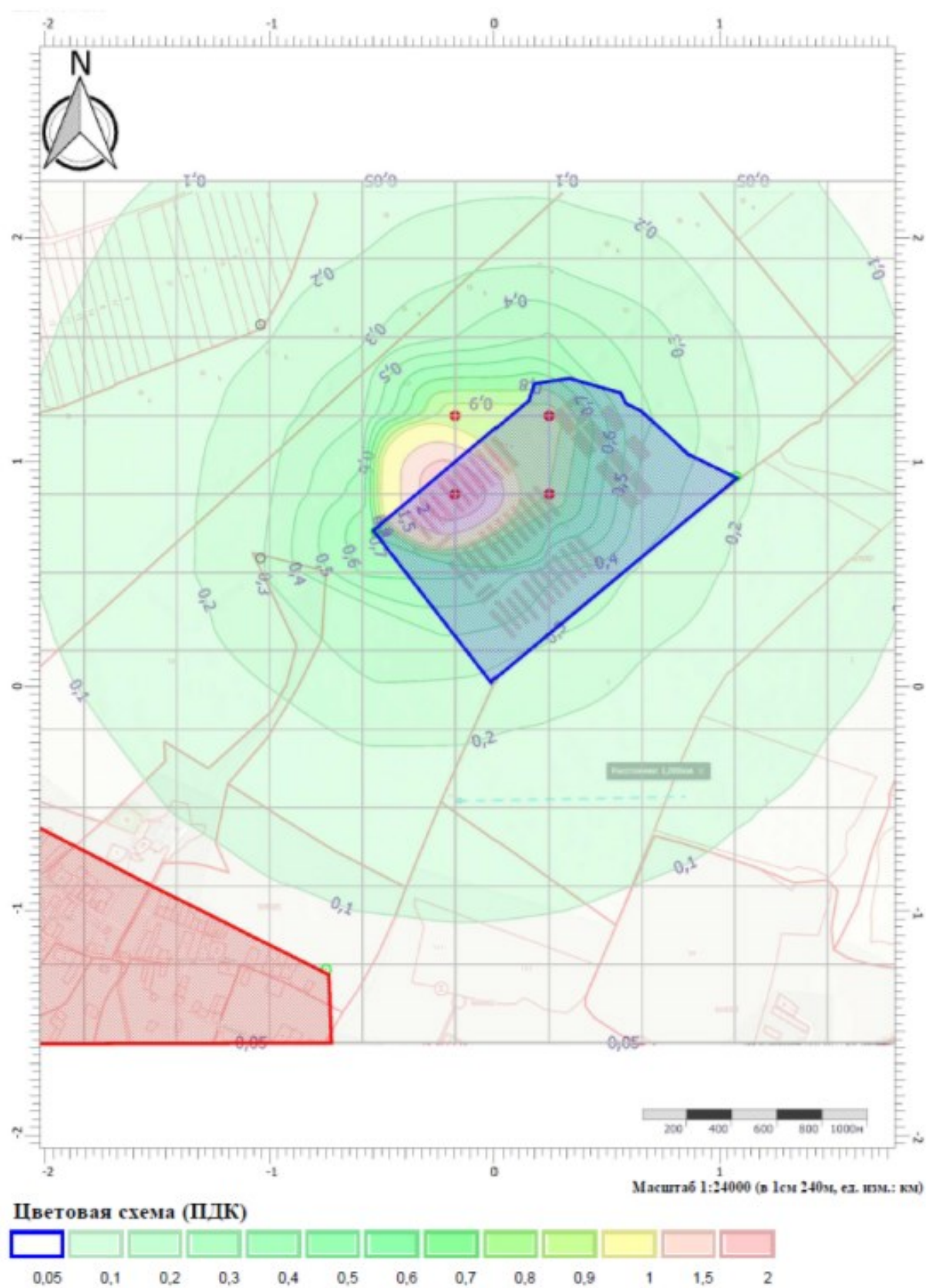


Рис. 1. Карта рассеивания выбросов аммиака

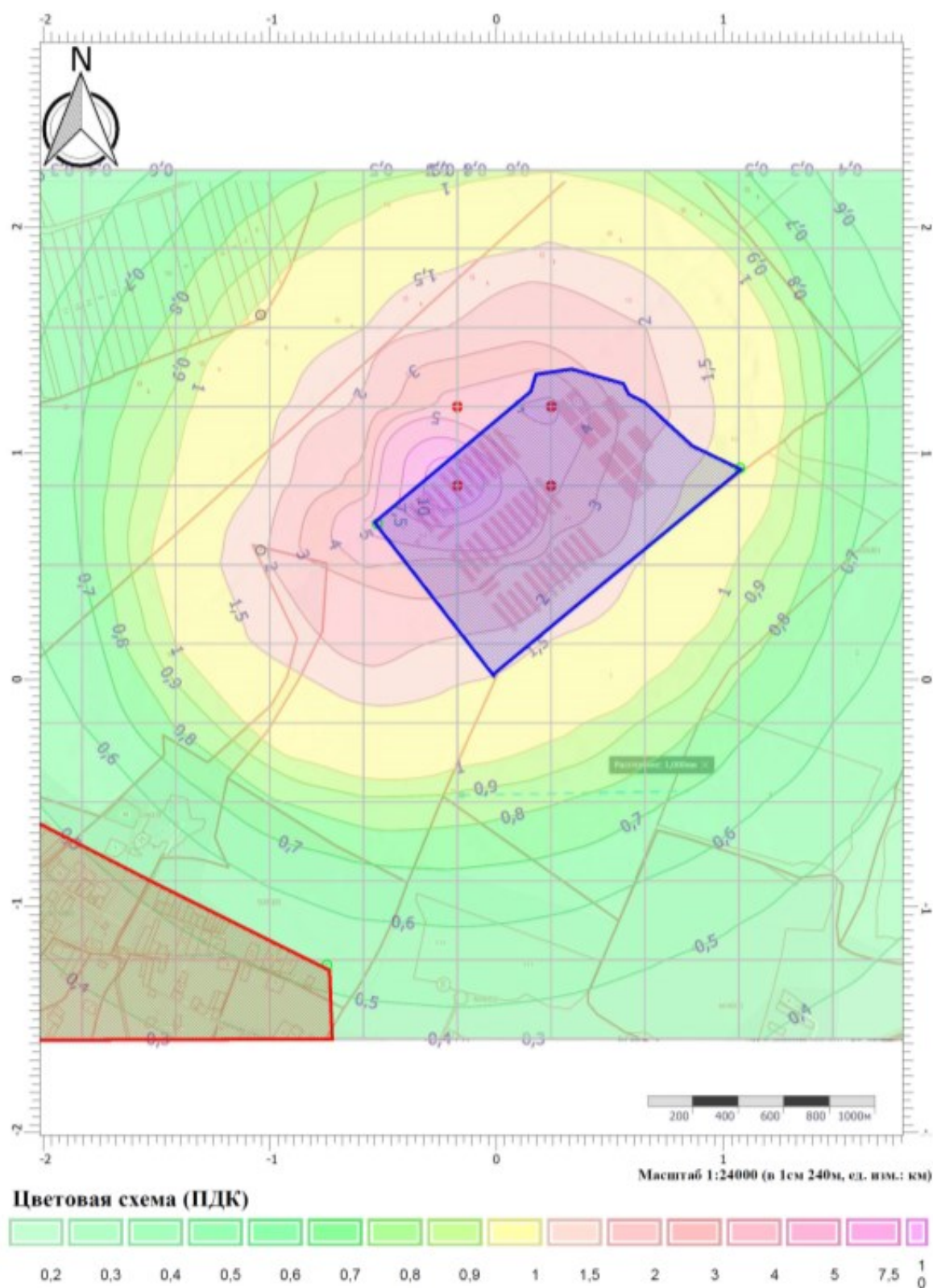


Рис. 2. Карта рассеивания выбросов аммиака, сероводорода

Выводы. В результате измерения концентрации вредных веществ на приточных клапанах установлено наличие фоновой концентрации вредных веществ в пределах норм (30 % ПДК), что свидетельствует о захвате приточной вентиляцией удаляемых из помещения вредных веществ.

Выделяющиеся в помещении вредные вещества (аммиак, сероводород) стратифицируются в зависимости от плотности (аммиак – $0,78 \text{ кг/м}^3$, сероводород – $1,57 \text{ кг/м}^3$) – для сравнения, плотность воздуха при нормальных условиях – $1,2 \text{ кг/м}^3$. Удаление выделяющихся вредных газов тяжелее воздуха обычно производится из нижней

зоны помещения, что не реализуется в исследуемых помещениях. Таким образом, для создания требуемых параметров микроклимата необходимо усовершенствование системы вентиляции в корпусах свинокомплекса. А для улучшения экологической обстановки на территории свинокомплекса необходима разработка дифференцированно-дискретной технологии введения деструкторов запаха в ванны приема навозосточков на свинокомплексах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведский В.А., Соколов Г.А., Трофимов А.Ф., Серяков И.С. Гигиена животных // Минск: Техноперспектива. 2009. 617 с.
2. Пат. 2725235 Российская Федерация МПК CO2F 1/52 Способ подготовки жидких отходов животноводческих комплексов для сельскохозяйственного использования / Т.А. Колесников, М.А. Куликова, Е.А. Грибунт, О.А. Суржко. Заявка 2018 131280, 29.08.2018; опубл. 21.11.2019, Бюл. №33.
3. Пат. 2424985 МПК CO2F 1/58 Способ подготовки жидких отходов животноводческих комплексов для сельскохозяйственного использования / О.А. Суржко, Ю.Е. Домашенко. Заявка 2009114816/05, 13.04.2009; опубл. 27.07.2011, Бюл. №21.
4. Колесников М.С., Ильина Т.Н., Евраев Д.А. Анализ способов организации приточно-вытяжной вентиляции на свиноводческих комплексах. // XIV международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Молодежь и научно-технический прогресс. 2021 г. Том 1. С. 480–484.
5. Фурсенко С.Н. Организация воздухообмена в помещениях для содержания КРС, свиней и птицы [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/362934/tehnika/organizatsiya_vozduhoobmena_pomescheniyah_soderzhaniya_sviney_ptitsy
6. Ильина Т.Н., Колесников М.С. Анализ способов повышения экологической безопасности животноводства // Межвузовский международный конгресс. Высшая школа: научные исследования. Москва. 10 декабря 2020г. Том 1. С. 160–166.
7. Ильина Т.Н., Лесунова М.А., Божко Ю.В. Организация воздушного отопления в галереях животноводческих комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. №1. С. 129–131.
8. Мионов В.Н., Гордеев В.В., Мионова Т.Ю. Очистка воздуха животноводческого помещения в культивационных сооружениях // Вестник ВНИИМЖ, 2012, №4(8). С. 69–72.
9. Краснова В.Л., Хазанов Е.Е., Маркова А.Е., Гордеев В.В. Перспективные способы утилизации вентиляционных выбросов животноводческих помещений // Сборник научных трудов СЗНИИМЭСХ. 2004. Вып. 76. С. 131–137.
10. Найденко В.К. Уменьшение негативного воздействия свиноводческих предприятий на окружающую среду // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2015. №87. С. 201–211.
11. Гордеев В.В., Гордеева Т.И., Мионов В.Н., Мионова Т.Ю. Способы снижения негативного воздействия на окружающую среду от ферм крупного рогатого скота. Региональная экология. 2015. № 5 (40). С. 12–14.
12. Найденко В.К., Трифанов А.В. Предпосылки к использованию прогрессивных технологий и технических средств на модульных свинофермах // Вестник ВНИИМЖ. 2013. №4 (12). С. 23–31.
13. Найденко В.К. Совершенствование технологий на свинофермах и свинокомплексах // Перспективное свиноводство: Теория и практика. 2011. №2. С. 6.
14. Евстигучев М.А. Ильина Т.Н. Перспективы использования отходов сахарных предприятий Белгородской области для производства биогаза / Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов: сб. докл. Междунар. молодежной конф., 12–14 ноябр., 2013 г. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. Ч.1. С. 254–256.
15. Ильина Т.Н., Евстигучев М.А. Современный подход решения проблемы переработки отходов АПК в Белгородской области: Сборник научных трудов по материалам Междунар. научно-практ. конф. 1 апреля 2013 г., часть 5. Мин-во обр. и науки. М.: «АР-Консалт», 2013. С. 66–67.
16. Минко В.А., Ильина Т.Н., Потапова О.Н. Анализ способов утилизации тепла от технологического оборудования в системах создания микроклимата производственных цехах молочных комбинатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. №4. С. 109–112.
17. Ильина Т.Н., Бельмаз Д.Н. Анализ и способы утилизации вторичных энергоресурсов нефтеперерабатывающего предприятия. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 170–173.

Информация об авторах

Ильина Татьяна Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: ilina50@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Щедрина Юлия Евгеньевна, начальник департамента агропромышленного комплекса и воспроизводства окружающей среды Белгородской области. Департамент агропромышленного комплекса и воспроизводства окружающей среды Белгородской области. Россия, 308001, Белгород, ул. Попова, д. 24.

Феоктистов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: alexwolf79@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Колесников Максим Сергеевич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: makskol97@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Евраев Дмитрий Андреевич, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: evradima@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.12.2021 г.

© Ильина Т.Н., Щедрина Ю.Е., Феоктистов А.Ю., Колесников М.С., Евраев Д.А., 2022

¹Il'ina T.N., ²Shhedrina Yu.E., ¹Feoktistov A.YU., ¹Kolesnikov M.S., ¹Evraev D.A.

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

²Department of Agroindustrial Complex and Environmental Reproduction of the Belgorod Region

**E-mail: ilina50@rambler.ru*

ABOUT THE ECOLOGICAL SITUATION ON THE TERRITORY OF THE OSKOLSKY BACON-3 PIG COMPLEX

Abstract. On the example of LLC "Agroindustrial Complex "Promagro", a list of biological preparations used in the Belgorod region to reduce unpleasant odors from manure effluents has been compiled. In this work, measurements of the content of harmful substances and the level of odors in pig fattening workshops and on the emission of ventilation shafts of pig-breeding complex buildings were carried out: concentrations of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxide (NO₂), sulfur oxide (SO₂), methane (CH₄), hydrogen sulfide (H₂S) and ammonia (NH₃), as well as the level of odors in the territories adjacent to the pig complex. The calculation of the dispersion of emissions of harmful and odorous substances in the territories (GOST R 58578-2019 Rules for the establishment of standards and control of emissions into the atmosphere) showed the need to introduce odor destructors into the manure intake baths. In the Belgorod region, the following biological destructors are used at various pig breeding complexes: "Embionic" "Bactofor-3", "Sanvit-K", "Sanvit-K-forte", "Doctor Robik LGN 050", "UBP Bius", "Ecomik Pro V". Among the enterprises actively using "Bactofor-3" is LLC "APK "Promagro", defined as the base. A comparative characteristic of the effectiveness of the drugs was carried out, the optimal concentrations of drugs for the introduction of manure into the baths were determined.

Keywords: pig complex, biological preparations, odor destructors, manure drains, lagoons, olfactometer, gas analyzer.

REFERENCES

1. Medvedskij V.A., Sokolov G.A., Trofimov A.F., Seryakov I.S. Animal hygiene [Gigiena zhivotnyh]. Minsk: Technoperspectiva. 2009. 617 p.

2. Kolesnikov T.A., Kulikova M.A., Gribut E.A., Surzhko O.A. Method of preparation of liquid waste of livestock complexes for agricultural use. Patent RF, no. 2018131280, 2019.

3. Surzhko O.A., Domashenko Yu.E. Method of preparation of liquid waste of livestock complexes for agricultural use. Patent RF, no. 2009114816/05, 2011.

4. Kolesnikov M.S., Il'ina T.N., Evraev D.A. Analysis of methods of organization of supply and exhaust ventilation at pig breeding complexes [Analiz sposobov organizacii pritochno-vytyazhnoj ventilyacii na svinovodcheskih kompleksah]. XIV International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Youth and scientific and technological progress. 2021. Vol. 1. Pp. 480–484.

5. Fursenko S.N. Organization of air exchange in premises for keeping cattle, pigs and poultry [Organizaciya vozduhoobmena v pomeshcheniyah dlya

soderzhaniya KRS, svinej i pticy]. [Electronic resource]. URL: https://studref.com/362934/tehnika/organizatsiya_vozduhoobmena_pomescheniyah_soderzhaniya_sviney_ptitsy.

6. Il'ina T.N., Kolesnikov M.S. Analysis of ways to improve the environmental safety of animal husbandry [Analiz sposobov povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti zhivotnovodstva]. Interuniversity International Congress. Higher school: scientific research. Moscow. December 10. 2020. Vol. 1. Pp. 160–166.

7. Il'ina T.N., Lesunova M.A., Bozhko YU.V. Organization of air heating in galleries of livestock complexes [Organizatsiya vozduhnogo otopleniya v galereyah zhivotnovodcheskih kompleksov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010. No. 1. Pp. 129–131.

8. Mironov V.N., Gordeev V.V., Mironova T.YU. Air purification of livestock premises in cultivation facilities [Ochistka vozduha zhivotnovodcheskogo pomeshcheniya v kul'tivacionnyh sooruzheniyah]. Bulletin of VNIIMZH. 2012. No. 4(8). Pp. 69–72.

9. Krasnova V.L., Hazanov E.E., Markova A.E., Gordeev V.V. Perspective methods of utilization of ventilation emissions of livestock premises [Perspektivnye sposoby utilizatsii ventilyacionnyh vybrosov zhivotnovodcheskih pomeshchenij]. Collection of scientific papers of the NWNIMESH. 2004. Issue. 76. Pp. 131–137.

10. Najdenko V.K. Reduction of the negative impact of pig-breeding enterprises on the environment [Umen'shenie negativnogo vozdejstviya svinovodcheskih predpriyatij na okruzhayushchuyu sredy]. Technologies and technical means of mechanized production of crop production and animal husbandry. 2015. No.87. Pp. 201–211.

11. Gordeev V.V., Gordeeva T.I., Mironov V.N., Mironova T.YU. Ways to reduce the negative impact on the environment from cattle farms [Sposoby snizheniya negativnogo vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredy ot ferm krupnogo rogatogo skota]. Regional ecology. 2015. No. 5(40). Pp. 12–14.

12. Najdenko V.K., Trifanov A.V. Prerequisites for the use of progressive technologies and technical means on modular pig farms [Predposylki k ispol'zovaniyu progressivnyh tekhnologij i tekhnicheskikh sredstv na modul'nyh svinofermah]. Vestnik VNIIMZH. 2013. No. 4(12). Pp. 23–31.

13. Najdenko V.K. Improvement of technologies on pig farms and pig complexes [Sovershenstvovanie tekhnologij na svinofermah i svinokompleksah]. Perspective pig breeding: Theory and practice. 2011. No. 2. Pp. 6.

14. Evstyunichev M.A., Il'ina T.N. Prospects for the use of waste from sugar enterprises of the Belgorod region for the production of biogas [Perspektivy ispol'zovaniya othodov saharnyh predpriyatij Belgorodskoj oblasti dlya proizvodstva biogaza]. Ecology and rational nature management of agro-industrial regions: collection of reports. International Youth Conference. November 12–14. 2013. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. Part 1. Pp. 254–256.

15. Il'ina T.N., Evstyunichev M.A. A modern approach to solving the problem of agro-industrial waste processing in the Belgorod region [Sovremennyy podhod resheniya problemy pererabotki othodov APK v Belgorodskoj oblasti]. A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference on April 1. 2013. Part 5. Ministry of Education and Science - M.: "AR-Consult". 2013. Pp. 66–67.

16. Minko V.A., Il'ina T.N., Potapova O.N. The analysis of the methods of heat recovery from process equipment in the microclimate systems manufacturing plants, dairy plants [Analiz sposobov utilizatsii tepla ot tekhnologicheskogo oborudovaniya v sistemah sozdaniya mikroklimata proizvodstvennyh cekhah molochnyh kombinatov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 4. Pp. 109–112.

17. Il'ina T.N., Bel'maz D.N. Analysis and methods of utilization of secondary energy resources of an oil refinery [Analiz i sposoby utilizatsii vtorichnyh energoresursov neftepererabatyvayushchego predpriyatiya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 3. Pp. 170–173.

Information about the authors

Il'ina, Tat'yana N. DSc, Professor. E-mail: ilina50@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shhedrina, Yuliya E. Head of the Department of Agroindustrial Complex and Environmental Reproduction of the Belgorod Region. Department of Agroindustrial Complex and Environmental Reproduction of the Belgorod Region. Russia, 308001, Belgorod, st. Popova, 24.

Feoktistov, Aleksej YU. PhD, Assistant professor. E-mail: alexwolf79@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kolesnikov, Maksim S. Postgraduate student. E-mail: makskol97@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Evraev, Dmitriy A. Master student. E-mail: evradima@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 16.12.2021

Для цитирования:

Ильина Т.Н., Щедрина Ю.Е., Феоктистов А.Ю., Колесников М.С., Евраев Д.А. Об экологической обстановке на территории свиного комплекса «Оскольский бекон-3» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 32–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-32-41

For citation:

Il'ina T.N., Shhedrina Yu.E., Feoktistov A.Yu., Kolesnikov M.S., Evraev D.A. About the ecological situation on the territory of the Oskolsky bacon-3 pig complex. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 32–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-32-41

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-42-51

Закиева Л.Ф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: zakievalily@gmail.com

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Аннотация. Статья посвящена выявлению особенностей размещения и функционирования компонентов системы лечебно-профилактических учреждений в планировочной структуре крупных городов в отечественной и зарубежной практике. Отечественный опыт представлен в городах, активно внедряющих реформы в систему здравоохранения: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Томск, Пермь. Выявляются особенности размещения лечебно-профилактических учреждений в зарубежных странах с высоким рейтингом эффективности системы здравоохранения: Сингапур, Гонконг, Великобритания, Германия, Израиль. Исследование проводилось на основе общенаучных методов: анализ, синтез и систематизация данных, выявленных из литературных, графических и интернет-ресурсов. В результате анализа пространственного размещения компонентов системы лечебно-профилактических учреждений составлены тепловые карты, демонстрирующие особенности размещения в планировочной структуре городов. Проводится анализ земельных участков стационарных многопрофильных учреждений на предмет выявления соответствия действующим нормативно-правовым документам, определения плотности застройки в зависимости от размещения в структуре города. В заключительной части работы проведен сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта территориального размещения и функционирования лечебно-профилактических учреждений. В работе выявлены две формы пространственной организации лечебно-профилактических учреждений: точечные «сетевые» и сконцентрированные на локальной территории взаимосвязанные и функционально зависимые организации – «медицинские кластеры».

Ключевые слова: лечебно-профилактические учреждения, планировочная структура, город, пространственное размещение, система здравоохранения.

Введение. Город – сверхсложный многоуровневый комплекс объектов его инфраструктуры [1]. Система лечебно-профилактических учреждений (далее ЛПУ) является одной из наиболее значимых городских систем. Систему ЛПУ формируют медицинские организации разной формы (амбулаторные, стационарные), специализации (многопрофильные, узкоспециализированные, высокотехнологичные), мощности, возрастного охвата (взрослые, детские, смешанные) и направленности (поликлиники, диспансеры, стационары и так далее). На сегодняшний день компоненты системы ЛПУ по зональному принципу подразделяются на 4 уровня: районные, городские, региональные, федеральные. Обеспеченность населения всеми компонентами системы ЛПУ определяет эффективность системы здравоохранения региона. Пандемия коронавируса наглядно продемонстрировала важность и значимость укомплектованности территории всеми компонентами системы ЛПУ. Именно в результате нехватки мощности существующих компонентов системы ЛПУ в 2020 году началось экстренное возведение инфекционных блоков в структуре существующих больниц, строительство крупных медицинских центров во многих регионах РФ. На территориаль-

ное размещение компонентов системы ЛПУ влияет ряд факторов: административных, социальных, демографических, экономических, градостроительных, ландшафтно-рекреационных, санитарно-гигиенических. Данная работа направлена на изучение градостроительного фактора при размещении компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре крупных и крупнейших городов, выявлению современных тенденций пространственной организации компонентов лечебной подсистемы города в отечественной и зарубежной практике.

Методология исследования. В работе применены общенаучные методы: анализ, синтез и систематизация данных, выявленных из литературных, графических и интернет-ресурсов. При изучении особенностей пространственного размещения ЛПУ в планировочной структуре города применен метод картографического анализа: на базе источников открытых данных, спутниковых снимков составлены планыграммы. Проведен натурный анализ территории земельных участков ЛПУ в г. Казани. С целью выявления особенностей размещения ЛПУ в структуре города в геоинформационной системе QGIS составлены тепловые карты – цветовое представление данных, соответствующих определенному значению.

Отечественный опыт размещения компонентов системы ЛПУ. В РФ действует Стратегия развития системы здравоохранения, которая регламентирует размещение и функционирование объектов здравоохранения. Основными положениями данной стратегии являются:

- медико-санитарное районирование территории города как способ овладения пространством путём его разделения [2];
- развитие трехуровневой ступенчатой системы лечебно-профилактических учреждений, которая состоит из консультативно-диагностических центров, амбулаторно-поликлинических учреждений, многопрофильных стационаров;
- структурная классификация лечебно-профилактических учреждений на объекты федерального, регионального, городского и районного значения;
- перепрофилирование нерентабельных и маломощных ЛПУ во вспомогательные медицинские организации, такие как дома престарелых, сестринские центры.
- развитие первичного звена ЛПУ с целью повышения доступности медицинской помощи населению [3].

Отечественный опыт размещения и функционирования ЛПУ изучен в крупных городах РФ: Казань, Москва, Санкт-Петербург, Томск, Пермь. Проведенный анализ размещения ЛПУ в планировочной структуре данных городов показал, что в РФ сохранилась ступенчатая система построения сетей объектов здравоохранения: элементы планировочной структуры города обеспечиваются компонентами системы ЛПУ, при этом, чем выше мощность ЛПУ – тем больше радиус обслуживания и количество прикрепленного населения. В отечественной практике, начиная с 2017 года, наблюдается тренд к формированию медицинских кластеров. Основоположником теории с кластеризации читается М. Портер, который определяет кластер как «группу географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере и взаимодополняющих друг друга» [4]. Положительный опыт кластерного развития предприятий в зарубежной практике стал основанием к внедрению кластеров в российскую экономику: формирование инновационных высокотехнологичных кластеров заложено в Концепцию долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 года; Стратегия инновационного развития РФ до 2020 года определяет кластерный подход в качестве эффективного вида экономического и территориального развития региона, повышающим эффективность социально-экономического и инновационно-технологического развития [5]. Поднимается вопрос

о необходимости перехода к модели многополюсного пространственного развития и формирования в РФ «полюсов конкурентоспособности» – кластеров.

Далее представлены основные положения проведенного анализа относительно каждого региона.

Москва характеризуется оптимизацией амбулаторных ЛПУ в результате объединения территориально близких районных поликлиник и формирования крупных амбулаторно-поликлинических центров, которые состоят из одной головной поликлиники и 5–7 филиалов. На сегодняшний день насчитывается 46 взрослых и 40 детских амбулаторно-поликлинических центров, при этом согласно документам стратегического планирования ожидается увеличение количества ЛПУ данного типа. В Москве реализован комплекс мероприятий по реструктуризации системы оказания медицинской помощи и повышению ее эффективности [6]. С целью сокращения транспортных издержек и затрат на покупку однотипного оборудования внедрены учреждения без деления на возрастные группы: сеть смешанных детско-взрослых поликлиник. Широко развиты учреждения коммерческого типа «Доктор рядом». Минимально гарантированный объем первичной медицинской помощи предоставляется в Центрах здоровья, функционирующих в радиусе 20-минутной транспортной доступности (рис. 1).

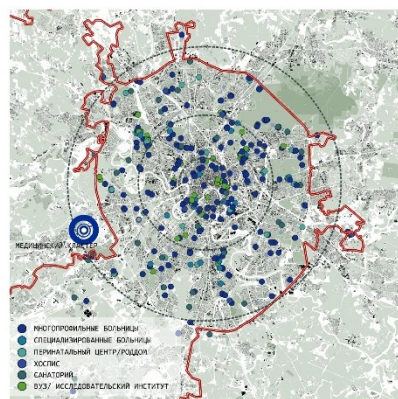
На территории Москвы проводятся реформы в системе стационарного медицинского обслуживания: действует политика «укрупнения» в результате присоединения больниц малой мощности и оснащенности к крупным многопрофильным стационарам. В работе проведен анализ земельных участков стационарных многопрофильных ЛПУ на предмет выявления плотности застройки в зависимости от размещения в структуре города. Коэффициент плотности застройки территории выявлялся в результате деления площади земельного участка ЛПУ на площадь застройки. Выявлено, что в Москве в среднем коэффициент плотности застройки земельного участка равен $k=4.18$. При этом зависимости показателя коэффициента от размещения ЛПУ в структуре города (центральная, срединная, периферийная зоны) не выявлено. Например, в Городской клинической больнице С.П. Боткина (2-й Боткинский пр-кт, 5) параметр плотности застройки составил $k=3.8$, в Городской клинической больнице №29 им. Н.Э. Баумана (Госпитальная площадь, 2) $k=4.5$, в Городской клинической больнице №13 им. З.А. Башляевой (ул. Панфиловцев, 28) $k=5.4$.

В Москве открываются специализированные сосудистые центры и разработана специальная система логистики, вследствие чего смертность от инфарктов в Москве снизилась в два раза. Для обеспечения доступности оказания медицинской помощи проведена реструктуризация психиатрических, онкологических лечебно-профилактических учреждений, службы медицинской реабилитации.

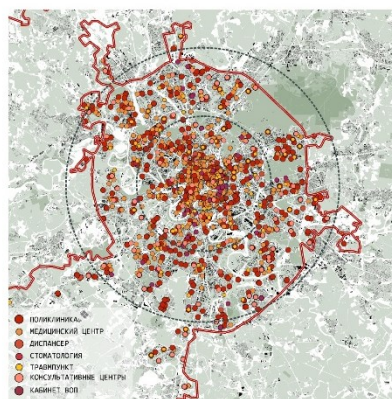
Развитая система здравоохранения и укомплектованность территории города компонентами системы лечебно-профилактических учреждений характерна и для **Санкт-Петербурга** (рис. 2). Данному факту способствует утвержде-

нные на территории города государственные программы, национальные проекты, стратегии. Согласно «Отраслевой схеме развития и размещения объектов здравоохранения на территории Санкт-Петербурга до 2025 года» территория города разделена на пять медико-санитарных районов. Приоритетными направлениями данных документов являются: развитие первичного звена медицинских организаций и профилактических учреждений; повышение эффективности функционирования узкоспециализированной высокотехнологичной медицинской помощи; развитие консультативно-диагностических и реабилитационных медицинских центров.

РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. МОСКВА



РАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. МОСКВА



ТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. МОСКВА

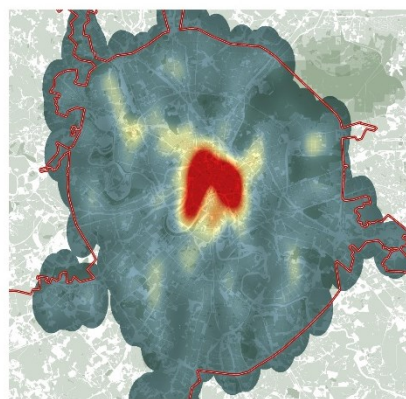
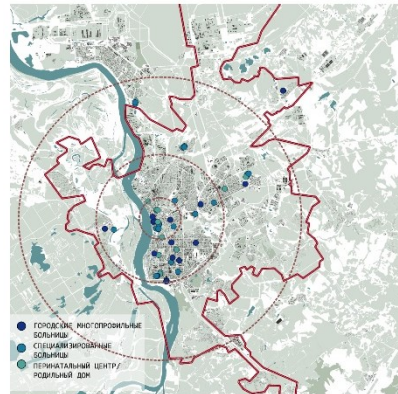


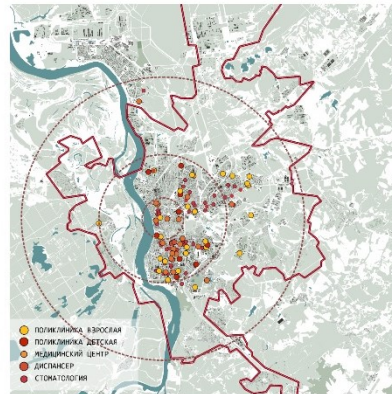
Рис. 1. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре г. Москвы.

Сост.: Закиева Л.Ф.

РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ В
ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



РАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ В
ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



ТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ В
ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

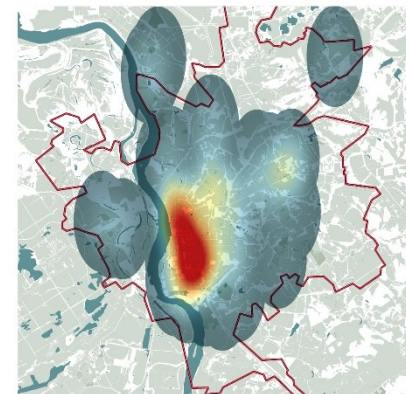


Рис. 2. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре г. Санкт-Петербург.

Сост.: Закиева Л.Ф.

Медико-санитарное районирование территории города повлияло на внедрение зонального принципа размещения стационаров: в районах массового жилищного строительства формируется система многопрофильных больниц. Как отмечает Пенюгина Е.Н., «при планировании стационарной медицинской помощи, необходимо предусмотреть трехуровневую модель, включающую зональный, городской и федераль-

ный (клинический) уровни» [7]. В Санкт-Петербурге действует классификация многопрофильных ЛПУ по видам медицинских услуг:

- высокооснащенные многопрофильные стационары, предназначенные для оказания специализированной помощи по всем профилям в круглосуточном режиме;
- стационары для оказания отдельных видов специализированной медицинской помощи в плановой форме;

- стационары для оказания восстановительного лечения и сестринского ухода.

Коэффициент плотности застройки территории земельных участков стационарных ЛПУ в Санкт-Петербурге ниже, чем в Москве, и в среднем равен $k=5.95$. При этом в периферийной зоне города наблюдается низкая плотность застройки, например, в Городской больнице № 15 (ул. Авангардная, 4) $k=8$, в Городской клинической больнице №31 (проспекту Динамо, 3) $k=7$.

В **Казани** функционируют 37 амбулаторно-поликлинических учреждений, которые имеют 129 филиалов, и 51 стационарных ЛПУ общей коечной мощностью 10 925 койко/мест [8]. На территории города активно идет процесс освоения пригородных территорий как в границах городов, так и в ближнем агломерационном поясе. Преимущественно строится жилье эконом-класса, которое характеризуется высокой плотностью застройки и низким качеством городской среды. При этом, если обеспеченности населения объектами школьного и дошкольного образования внимание уделяется, то объектам медицинского обслуживания – нет. На территории г. Казани выявлен ряд проблем планировочного характера:

- радиус доступности существующих амбулаторных учреждений, особенно в периферийной зоне города, значительно превышает нормативные показатели;

- недостаточная охваченность жилых территорий стационарными ЛПУ;

- недостаточное количество узкоспециализированных медицинских организаций;

- неразвитость учреждений первичной медицинской помощи, особенно профилактических ЛПУ.

Городские многопрофильные больницы г. Казани проанализированы с точки зрения соответствия мощности больницы требуемому размеру земельного участка согласно действующим градостроительно-нормативным документам. Рассмотрен вопрос обеспеченности лечебного учреждения нормируемым количеством парковочных мест для посетителей и персонала. Выявлено, что в каждом административном районе г. Казани функционируют многопрофильные городские больницы, радиус обслуживания которых составляет в среднем 3 км. Наиболее крупные медицинские учреждения расположены в Ново-Савиновском районе (Городская клиническая больница №7 мощностью 1164 коек), Вахитовском (Республиканская клиническая больница-2 мощностью 866 коек) и Приволжском районах (Республиканская клиническая больница мощностью 1309 коек). В Советском районе располагаются ключевые специализированные клиники:

Республиканский онкологический диспансер Министерства здравоохранения РТ и Психиатрическая клиника им. Бехтерева.

Анализ земельных участков стационарных многопрофильных ЛПУ позволил сделать следующие выводы:

- выявлено несоответствие коечной мощности и размера земельного участка: требуется расширение занимаемых земельных участков;

- территории земельных участков большинства городских больниц не имеют рекреационной зоны;

- выявлено недостаточное количество парковочных мест для пациентов больницы и обслуживающего персонала.

В **Перми** внедрена трехуровневая система здравоохранения и сформированы 11 межмуниципальных центров со специализацией в области травматологии, кардиологии, пульмонологии, онкологии, что позволило обеспечить население специализированной медицинской помощью, максимально приближенной к месту жительства (рис. 3). На базе существующих больниц формируются специализированные педиатрические отделения. Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями осуществляется в сосудистых центрах: открыты 6 первичных сосудистых отделений и 1 региональный сосудистый центр. Коэффициент плотности застройки территории земельных участков стационарных ЛПУ в Перми относительно высокий в центральной зоне города, например, в Пермской клинической больнице (ул. Пушкина, 85) $k=3.3$, и постепенно снижается к периферийной зоне города: в Краевой детской клинической больнице (ул. Баумана, 22) $k=4,7$, Городской клинической больнице №21 (ул. Липатова, 17) $k=7$.

Внедрение в планировочную структуру региона межмуниципальных медицинских центров, способствующих повышению территориальной доступности компонентов ЛПУ для жителей сельской местности, характерна также и для города **Томск** (рис. 4). В регионе действуют 7 межмуниципальных центров, 8 центров амбулаторной хирургии. Узкоспециализированная помощь оказывается в первичных сосудистых отделениях и в региональном сосудистом центре.

Коэффициент плотности застройки территории земельных участков стационарных ЛПУ в Томске низкий относительно других регионов в РФ. Например, в Областной клинической больнице (ул. Черных, 96) $k=7$, в Городской клинической больнице № 3 им. Б. И. Альперовича (ул. Нахимова, 3) $k=5.6$, в Больнице скорой медицинской помощи (ул. Рабочая, 21) $k=5$

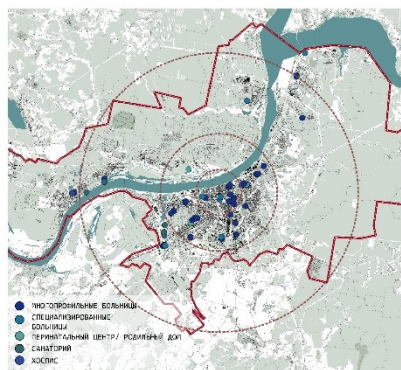
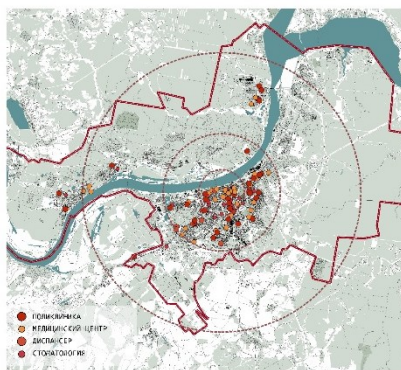
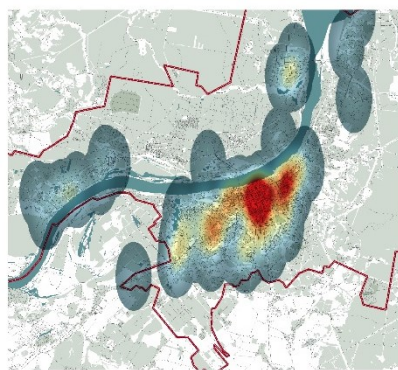
РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ПЕРМЬРАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ПЕРМЬТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ПЕРМЬ

Рис. 3. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре г. Пермь. Сост.: Закиева Л.Ф.

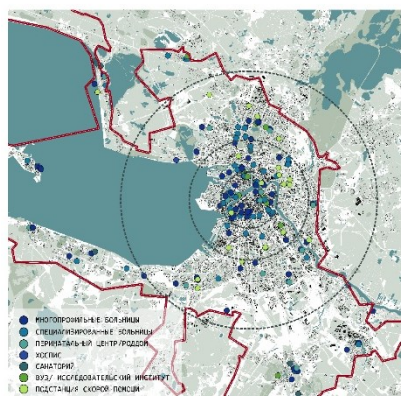
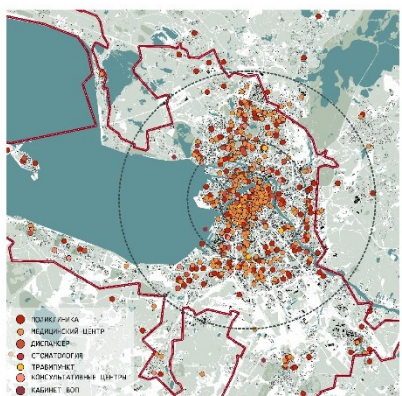
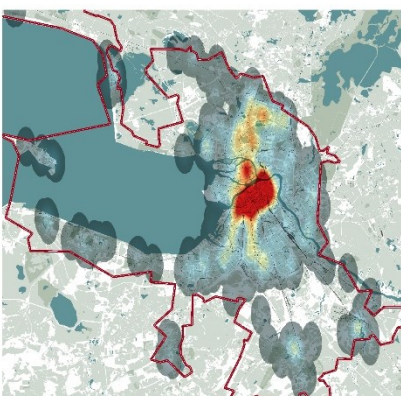
РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТОМСКРАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТОМСКТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТОМСК

Рис. 4. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре г. Томск. Сост.: Закиева Л.Ф.

Зарубежный опыт размещения компонентов системы ЛПУ. В зарубежной практике наблюдается тенденция сокращения стационарных ЛПУ в результате уменьшения коечной мощности и внедрения дополнительных функциональных блоков: в Норвегии расширяют амбулаторные ЛПУ, в Германии наблюдается развитие реабилитационных ЛПУ, в Сингапуре активно внедряются новые формы первичных амбулаторных ЛПУ. Выявлено применение кластерного подхода в развитие системы здравоохранения. Медицинские кластеры – совокупность равноуровневых медицинских учреждений, обеспечивающих технологии диагностического, лечебного, профилактического, реабилитационного процессов [9]. Например, в Гонконге сформировано 7 медицинских кластеров, внутри которых организован непрерывный процесс оказания всех этапов медицинской помощи: амбулаторно-профилактической, стационарной, узкоспециализированной, неотложной и другой.

Далее проведен детальный анализ территориального размещения ЛПУ в структуре городов в странах с наиболее высоким рейтингом системы здравоохранения: Сингапур, Гонконг, Израиль, Гамбург в Германии и Лондон в Великобритании.

В Великобритании сформировано 18 многопрофильных и 16 специализированных трестов со специализацией в области онкологии, кардиологии, скорой помощи и других. [10]. В Лондоне широко развиты учреждения первичной амбулаторной медицинской помощи, при этом отсутствует территориальный принцип прикрепления к ЛПУ по месту жительства. Активно функционируют медицинские центры «walk in centre», обслуживающие население в радиусе доступности 1.5–3 км в центральной и периферийной зонах и 3–5 км в периферийной зоне. В центральной части Лондона выявлена высокая концентрация университетских клиник. Большое внимание уделяется учреждениям, предоставляющим долгосрочный уход пожилым людям.

Многопрофильные больницы преимущественно размещаются в срединной и периферийной зонах (рис. 5). Стационарные ЛПУ являются многопрофильными: необходимые узкоспециализированные отделения размещаются в структуре существующих больниц в виде отдельных корпусов. Перестраивается система стационарного лечения острых случаев, путем создания отдельных учреждений по долгосрочному уходу и реабилитации [11].

Внедрена трехуровневая система стационарной медицинской помощи:

- общинные больницы;
- районные больницы;
- высокотехнологичные больницы [12].

В Лондоне внедрена сеть травматологических центров, состоящая из 4 центров крупной травмы и 35 отделений травматологии, равномерно рассредоточенных по территории города. Функционирует сеть из 7 сердечно-сосудистых центров, предоставляющих неотложную высокотехнологичную медицинскую помощь.

Изучение особенностей организации земельных участков позволило выявить, что коэффициент плотности застройки территории ЛПУ в Лондоне значительно выше, чем в городах РФ. Например, в Больнице Святого Томаса $k=2.2$, в Университетском госпитале $k=3.0$, в Госпитале Хомертона $k=3.8$. Выявлена зависимость плотности застройки от размещения в структуре города: чем ближе к центру города расположено ЛПУ – тем выше коэффициент плотности застройки земельного участка ЛПУ.

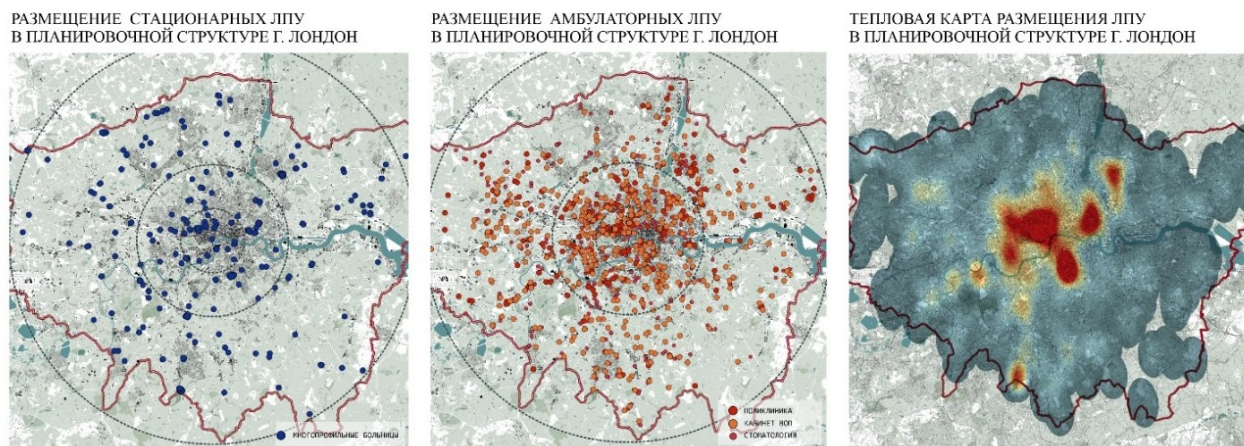


Рис. 5. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре Лондона. Сост.: Закиева Л.Ф.

Система здравоохранения **Гамбурга** считается одной из наиболее развитых и эффективных в Европе [13, 14]. В Гамбурге функционирует отраслевой медицинский кластер «Асклепиос», который состоит из семи многопрофильных стационаров и одной реабилитационной клиники, предоставляет медицинскую помощь населению города и соседних регионов. Первичная и специализированная амбулаторная медицинская помощь в Гамбурге является преимущественно коммерческой. Широкое распространение получили больницы для краткосрочного лечения, предоставляющие профилактическую и реабилитационную медицинскую помощь. В регионе отсутствует смешанная стационарно-амбулаторная модель предоставления медицинской помощи [15]. Больницы в Германии классифицируются на специализированные, больницы общего профиля и университетские клиники (рис. 6). Коэффициент плотности застройки территории земельных участков стационарных ЛПУ в Гамбурге относительно высокий: в Больнице им. Св. Георгия $k=2.8$, в Университетской клинике Гамбурга $k=3.2$, в Клинике Асклепиос $k=4.0$.

Сингапур характеризуется внедрением кластерного подхода организации системы здравоохранения: сформированы Центральный, Во-

сточный и Западный кластеры. В каждом кластере выстроена система преемственной и этапной медицинской помощи: ЛПУ общего профиля функционируют совместно с домами престарелых, дневными стационарами, реабилитационными центрами, амбулаторными учреждениями в пределах географического региона.

В Сингапуре развит сектор первичной медико-санитарной помощи, который является основой системы здравоохранения региона. При этом первичную амбулаторную медицинскую помощь преимущественно предоставляют частные коммерческие организации: насчитывается 1700 коммерческих клиник общего профиля и 18 государственных поликлиник. Активно внедряются новые формы амбулаторных ЛПУ: клиники семейной медицины, кабинеты врача общей практики, медицинские центры и другие (рис. 7).

Территории земельных участков стационарных ЛПУ в Сингапуре характеризуются высокой плотностью застройки, что является результатом развитой системы медицинских блоков ЛПУ и отсутствия прогулочной рекреационной зоны. Например, коэффициент плотности застройки в Многопрофильном госпитале Чанги $k=2.1$, в Медицинском центре Новена $k=3.5$, в Многопрофильной больнице Сингапура $k=4.2$.

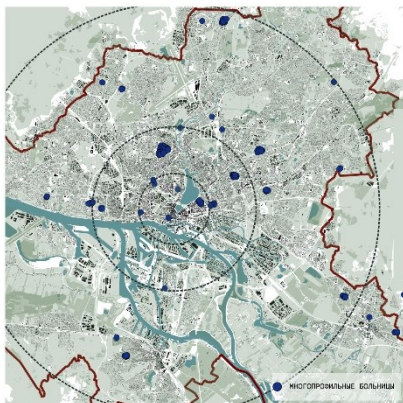
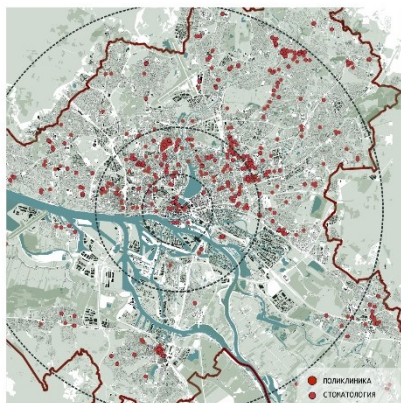
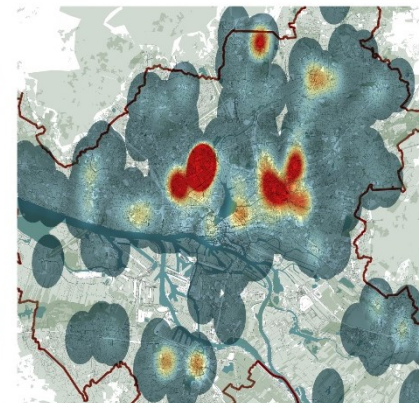
РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ГАМБУРГРАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ГАМБУРГТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ГАМБУРГ

Рис. 6. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре Гамбурга.

Сост.: Закиева Л.Ф.

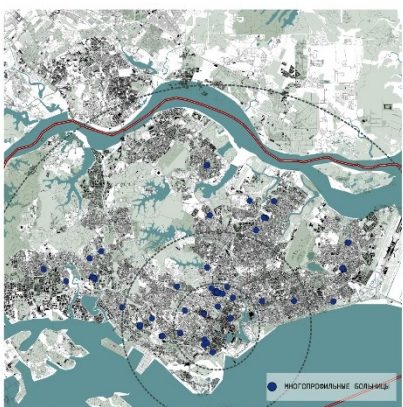
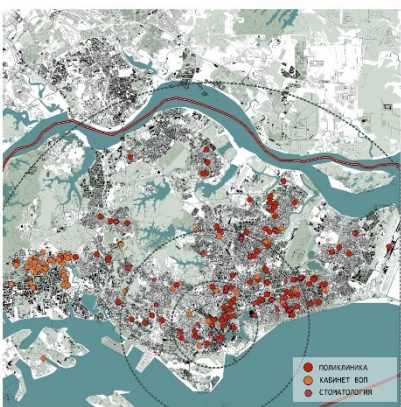
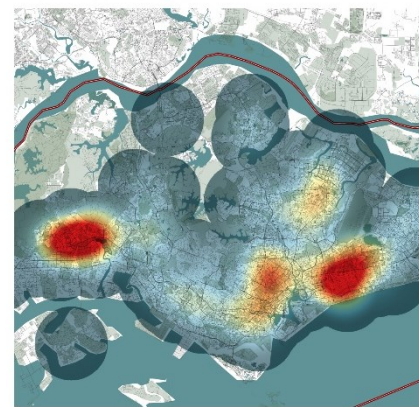
РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. СИНГАПУРРАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. СИНГАПУРТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. СИНГАПУР

Рис. 7. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре Сингапура.

Сост.: Закиева Л.Ф.

Особенностью организации медицинского обслуживания в **Израиле** является отсутствие принципа участковости и территориального прикрепления к определенному ЛПУ: в стране действуют больничные кассы с возможностью выбора специалиста и медицинской организации (рис. 8). Особенностью размещения медицинских организаций в Израиле является их равноудаленность друг от друга. Стационарные ЛПУ в Израиле преимущественно являются многопрофильными и функционируют как медицинские районы. Например, клиника Шибя в городе Рамат-Ган, размещенная на территории общей площадью 60 га, сформирована на базе общей клинической больницы, детской больницы «Сафра» и реабилитационного центра. В данной клинике организовано 7000 рабочих мест, мощность ЛПУ – 2000 коек.

Проведен анализ на предмет определения зависимости площади земельного участка относительно коечной мощности больницы. Частные медицинские учреждения характеризуются большой площадью застройки земельного участка,

высокой этажностью, в результате чего показатель отношения площади земельного участка относительно мощности медицинского учреждения равен 8 кв.м. на 1 койку. Государственные медицинские учреждения Израиля проектируются как целые медицинские районы, включающие в себя не только стационары, но и реабилитационные центры для различных групп населения, узкоспециализированные центры, медицинские исследовательские институты, научно-образовательные центры и другие. Также на территории данных больниц находятся объекты обслуживания: торговые центры, гостиницы, банки и т. д. В результате многопрофильности данных учреждений показатель отношения площади земельного участка относительно мощности медицинского учреждения значительно выше, чем в коммерческих ЛПУ, и равен 233 кв. м. на 1 койку. Общей чертой всех ЛПУ Израиля является отсутствие рекреационно-парковой зоны, что является результатом высокой плотности застройки.

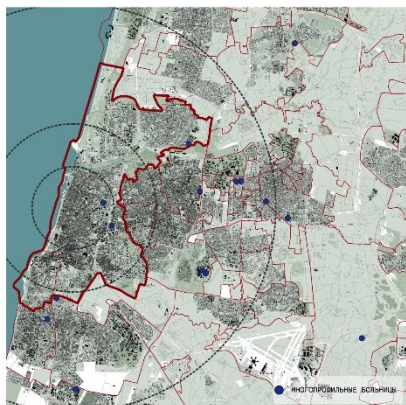
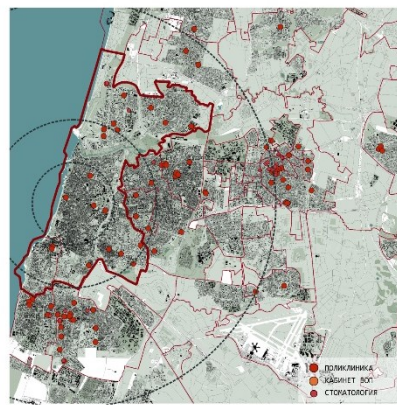
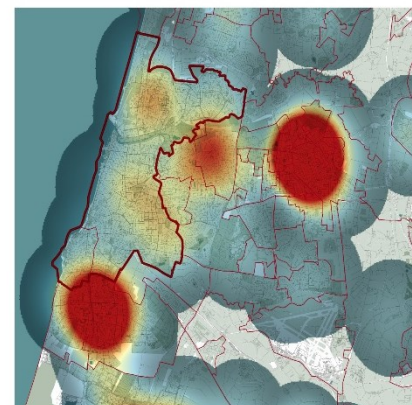
РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТЕЛЬ-АВИВРАЗМЕЩЕНИЕ АМБУЛАТОРНЫХ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТЕЛЬ-АВИВТЕПЛОВАЯ КАРТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛПУ
В ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЕ Г. ТЕЛЬ-АВИВ

Рис. 8. Размещение компонентов системы ЛПУ в планировочной структуре Тель-Авива.

Сост.: Закиева Л.Ф.

Выводы.

1. Проведенный анализ показал, что зарубежная система здравоохранения развита и широко представлена амбулаторными и стационарными компонентами системы ЛПУ разной формы и специализации. Разработанные в исследовании тепловые карты выявили относительно равномерную рассредоточенность компонентов системы ЛПУ в срединной, периферийной и центральной зонах в Лондоне, Гамбурге, Тель-Авиве и Сингапуре. При этом размер земельного участка и коэффициент плотности застройки стационарных многопрофильных больниц в зарубежной практике зависит от размещения в структуре города: чем ближе к центральной зоне – тем выше коэффициент плотности застройки и меньше площадь земельного участка. В целом в зарубежных стационарных ЛПУ коэффициент плотности застройки выше, чем в отечественной практике.

2. Анализ отечественного опыта территориального размещения и функционирования ЛПУ продемонстрировали следующую закономерность: наблюдается высокая плотность размещения ЛПУ в центральной, срединной зонах и постепенное понижение плотности ближе к периферии в результате активного освоения периферийных районов города под строительство жилья без обеспечения территории необходимыми социальными объектами медицинского профиля. Коэффициент плотности застройки территории стационарных ЛПУ достаточно низок по сравнению с зарубежными странами и не зависит от зоны размещения в планировочной структуре города.

3. Выявлено, что для современной системы здравоохранения характерны две основные формы территориального размещения компонентов системы ЛПУ: сетевая и кластерная. Сетевую форму образуют ЛПУ, предоставляющие амбулаторную медицинскую помощь. Кластерную

форму формируют сконцентрированные на локальной территории взаимосвязанные и функционально зависимые медицинские учреждения в комплексе с научно-исследовательскими, образовательными, производственными организациями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лола А.М. Основы градостроения и теории города. М.: Изд-во: КомКнига, 2005. 324 с.
2. Родоман Б.Б. Районирование как обладание пространством // Региональные исследования. 2017. №3. С. 4–12.
3. Улумбекова Г.Э. Здравоохранение России: 2018-2024. Что надо делать // ОРГЗДРАВ: новости, мнения, обучение. 2018. №1. С. 9–16.
4. Портер М. Конкуренция. М.: Издательский дом Вильямс, 2000. 610 с.
5. Бабкин А.В. Исследование кластерно-сетевых структур в инновационном развитии экономики региона (на примере Пермского края) // Формирование новой экономики и кластерные инициативы. 2017. №2. С. 392–409.
6. Шишкин С.В. Российское здравоохранение в новых экономических условиях: вызовы и перспективы. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2017. 84 с.
7. Пенюгина Е.Н. Методические подходы к планированию стационарной медицинской помощи с учетом основных направлений социально-экономического развития крупного города // Сборник научных трудов. Проблемы городского здравоохранения. 2008. №13. С. 111–113.
8. Дембич А.А., Закиева Л.Ф. Медицинские кластеры на Территории МО г. Казань как «точки роста» медицины региона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. №2. С. 79–86.

9. Лебединская Ю.С. Медицинский кластер: понятие и специфические черты // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2016. № 10. С. 170–173.

10. Фигерас Ж., Макки М., Моссиалос Э., Солтман Р.Б. Реформа больниц в новой Европе. Пер. с англ. М.: Издательство Весь мир, 2002. 320 с.

11. Cylus J.A., Hernandez-Quevedo C., Karanikolos V., Maresso A. United Kingdom Health system review. UK.: London School of Economics and Political Science, 2015. 514 p.

12. Ruth J.B., Müller R., Brüggmann D., Groneberg D.A. Spatial Accessibility of Primary

Care in England // Health services research. 2018. №53. Pp. 1957–1978.

13. Gordon G., Goebel L. Schwettmann L. Primary care in Germany: access and utilization across-sectional study with data from the German Socio-Economic Panel // British Medical Journal Publishing Group. 2018. №10. Vol. 8. Pp. 1–10.

14. Voigtländer S. Minimum standards for the spatial accessibility of primary care: a systematic review // Gesundheitswesen. 2015. №77. Pp. 949–957.

15. Blümel M., Spranger A., Achstetter K., Maresso A., Busse R. Germany: Health system review. Copenhagen.: Health Systems in Transition, 2020. 308 p.

Информация об авторах

Закиева Лилия Фаритовна, кандидат архитектуры, старший преподаватель кафедры градостроительства и планировки сельских населенных мест. E-mail: zakievalily@gmail.com. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1.

Поступила 14.11.2021 г.

© Закиева Л.Ф., 2022

Zakieva L.F.

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: zakievalily@gmail.com

DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE OF TERRITORIAL PLACEMENT AND FUNCTIONING OF HEALTHCARE FACILITIES

Abstract. The primary task of our work is to determine the distribution and functioning of healthcare facilities in the planning structure of large cities in domestic and foreign practice. Domestic experience is present in cities which are characterized by introducing reforms in the health system: Moscow, St. Petersburg, Kazan, Tomsk, Perm. We studied the features of the distribution of healthcare facilities in cities which are characterized by an active policy of reforming the health care system: Singapore, Hong Kong, Great Britain, Germany, Israel. The research have been conducted on the basis of general scientific methods: analysis, synthesis and systematization of data identified from literary, graphic and Internet resources. As a result of analysis the spatial placement of the components the healthcare facilities we have been compiled the heat maps, which demonstrating the features of placement in the planning structure of cities. We have been analyzing a land plots of healthcare facilities to identify the compliance to the current regulatory documents and to determine the density of development depending on the location in the structure of the city. We have been carrying out a comparative analysis of the domestic and foreign experience of the spatial distribution of healthcare facilities. As a result, we have been identified two forms of spatial organization of healthcare facilities: point-based «network» and interconnected and functionally dependent organizations concentrated on a local territory the «medical clusters» – one of the most important trends of health care system.

Keywords: healthcare facilities, planning structure, city, spatial placement, health care system.

REFERENCES

1. Lola A.M. Fundamentals of urban studies and theory of the city [Osnovy gradovedeniya i teorii goroda]. M.: Publishing house KomKniga, 2005. 324 p. (rus)

2. Rodoman B.B. Zoning as the possession of space [Rajonirovanie kak obladanie prostranstvom]. Regional studies. 2017. No. 3. Pp. 4–12. (rus)

3. Ulumbekova G.E. Healthcare of Russia: 2018-2024. What to do [Zdravoohranenie Rossii:

2018-2024. Chto nado delat']. ORGZDRAV: news, opinions, training. 2018. No. 1. Pp. 9–16. (rus)

4. Porter M. Competition [Konkurenciya]. M.: Williams Publishing House, 2000. 610 p. (rus)

5. Babkin A.V. The study of cluster-network structures in the innovative development of the economy of the region (on the example of the Perm Region) [Issledovanie klasterno-setevykh struktur v innovacionnom razvitii ekonomiki regiona (na primere Permskogo kraja)]. Formation of a new economy and cluster initiatives. 2017. No. 2. Pp. 392–409. (rus)

6. Shishkin S.V. Russian healthcare in new economic conditions: challenges and prospect [Rossijskoe zdavoohranenie v novyh ekonomicheskikh usloviyah: vyzovy i perspektivy]. M.: Publishing House of the Higher School of Economics, 2017. 84 p. (rus)

7. Penyugina E.N. Methodological approaches to the planning of inpatient medical care taking into account the main directions of socio-economic development of a large city [Metodicheskie podhody k planirovaniyu stacionarnoj medicinskoj pomoshchi s uchetom osnovnyh napravlenij social'no-ekonomicheskogo razvitiya krupnogo goroda]. Sbornik nauchnyh trudov. Problemy gorodskogo zdavoohraneniya. 2008. No. 13. Pp. 111–113. (rus)

8. Dembich A.A., Zakieva L.F. Medical clusters on the Territory of the Kazan MO as «growth points» of regional medicine [Medicinskie klastery na territorii MO g. Kazan' kak «tochki rosta» mediciny regiona]. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2016. No. 2. Pp. 79–86. (rus)

9. Lebedinskaya Yu.S. Medical cluster: concept and specific features [Medicinskij klaster: ponyatie i specificheskie cherty]. Azimut of scientific research: economics and management. 2016. No. 10. Pp. 170–173. (rus)

10. Figueres J., McKee M., Mossialos E., Saltman R.B. Hospital reform in New Europe. Trans. from English [Reforma bol'nic v novoj Evrope. Per. s angl.]. M.: Publishing House The whole world, 2002. 320 p. (rus)

11. Silus J.A., Hernandez-Quevedo S., Karanikolos V., Maresso A. Review of the health system of the United Kingdom. Great Britain.: London School of Economics and Political Sciences, 2015. 514 p.

12. Ruth J.B., Muller R., Bruggman D., Gronenberg D.A. Spatial accessibility of primary care in England. Health research. 2018. No. 53. Pp. 1957–1978.

13. Gordon G., Goebel L. Schwettmann L. Primary medical care in Germany: access and use in the framework of a comprehensive study using data from the German socio-economic group. Publishing Group «British Medical Journal». 2018. No. 10. Vol. 8. Pp. 1–10.

14. Voigtlander S. Minimum standards of spatial accessibility of primary medical care: a systematic review. Gesundheitswesen. 2015. No. 77. Pp. 949–957.

15. Blümel M., Spranger A., Achstetter K., Maresso A., Busse R. Germany: Health system review. Copenhagen.: Health Systems in Transition, 2020. 308 p.

Information about the authors

Zakieva, Liliya F. PhD, Assistant professor. E-mail: zakievalily@gmail.com. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Received 14.11.2021

Для цитирования:

Закиева Л.Ф. Отечественный и зарубежный опыт территориального размещения и функционирования лечебно-профилактических учреждений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 42–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-42-51

For citation:

Zakieva L.F. Domestic and foreign experience of territorial placement and functioning of healthcare facilities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 42–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-42-51

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-52-60

¹Чечель И.Н., ^{2,3,*}Перькова М.В., ¹Дубино А.М., ¹Чечель И.П.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого³Российский университет Дружбы Народов

*E-mail: Golden-Line7@yandex.ru

РЕКОНСТРУКЦИЯ С ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ЗДАНИЯ КАНЦЕЛЯРИИ И ГОРОДСКОЙ УСАДЬБЫ МИРОВОГО СУДЬИ КУРЧАНИНОВА В БЕЛГОРОДЕ

Аннотация. Актуальность темы определяется необходимостью решения комплекса проблем, связанных с реконструкцией объектов культурного наследия регионального значения с приспособлением под современное использование с учетом инвестиционной привлекательности. Проблема сохранения культурного наследия в постиндустриальном обществе обусловлена сохранением памяти места, его истории и традиций. Сохранение и реставрация с приспособлением под новую функцию объектов культурного наследия сохраняет городскую идентичность, делает городскую среду уникальной и привлекательной для жителей. Проведен градостроительный и объемно-планировочный анализ объекта культурного наследия с целью его реконструкции и приспособления для современного использования. Разработаны варианты реконструкции и приспособления. Варианты решений обоснованы комплексной оценкой для принятия решений. Перечень критериев и вопросы для количественной оценки были уточнены специально применительно к процессу реконструкции объекта культурного наследия. В результате количественного анализа получен объективный результат, позволяющий оценить эффективность разработанных предложений с позиции населения, властей, бизнеса и прочих участников градостроительной деятельности. Выявлено оптимальное концептуальное проектное предложение. Предложенные мероприятия позволят сохранить объект культурного наследия, создать новые рабочие места, реализовывать культурные и социальные проекты для различных групп потребителей.

Ключевые слова: объект культурного наследия, реконструкция, приспособление, количественная оценка, критерии

Введение. Актуальность темы определяется необходимостью решения комплекса проблем, связанных с реконструкцией объектов культурного наследия регионального значения с приспособлением под современное использование с учетом инвестиционной привлекательности (п73-фз. 2020).

Проблема сохранения культурного наследия в постиндустриальном обществе обусловлена сохранением памяти места, его истории и традиций для всестороннего развития человеческого потенциала [1]. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что реконструкция с приспособлением под современные функции способствует формированию идентичности населенных пунктов, открытию новых рабочих мест, социализации и притяжению туристических потоков, а также улучшению экологического состояния городской среды [2, 3]. Вопросами истории, сохранения, охраны культурного наследия в России и странах СНГ занимались М.С. Штиглиц, Р.П. Подольский, И.В. Федосеева, Ю.И. Казанцев, С.П. Калита, И.Н. Юркин, М.А. Гранстрем, С.В. Семенцов, А.А. Скокан, Т.А. Славина, В.И. Шередега и др. Анализу историко-культурной среды Центрального Черноземья и охраны культурного

наследия Белгородской области посвящены исследования А.Е. Енина, Л.И. Колесниковой, В. Собрывина, В.В. Овчинникова, М.В. Перьковой, Е.В. Холодовой. В статье рассматриваются варианты приспособления объекта культурного наследия с учетом инвестиционной привлекательности. Варианты решений обоснованы комплексной оценкой для принятия решений.

Объектом исследования является объект культурного наследия «Усадьба Курчанинова».

Цель исследования – выявление оптимальных вариантов реконструкции с приспособлением под современное использование объекта культурного наследия с учетом инвестиционной привлекательности.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использовались комплексный и средовой подходы, картографический анализ. В исследовании использованы архивные источники и картографические материалы, существующие нормативные и рекомендательные документы в области охраны культурного наследия РФ. Также в представленном исследовании использован количественный метод комплексной оценки по критериям для оценки разработанных вариантов реконструкции с приспособлением ОКН под современное использование.

Основная часть. Зачастую исторические центры муниципальных районов являются на сегодняшний день точками инновационного роста и развития культурно-исторических традиций [4].

В административных центрах муниципальных районов Белгородской области есть объекты культурного наследия, которые можно рассматривать с позиций их «...корреляционных связей с понятием «культурные ценности» [5]. Такие ценностные императивы «...влияют на принятие решения о приспособлении памятника архитектуры для современного использования (утилитарно-функциональная, градостроительная, историческая и эмоциональная ценности)» [6].

Рассмотрим объекты культурного наследия регионального значения – здания канцелярии и городской усадьбы мирового судьи Курчанинова в Белгороде. Здания канцелярии и городской усадьбы мирового судьи Курчанинова в Белгороде являлись образцом провинциального классицизма. История ансамбля началась с расположения на его месте деревянного дома семьи Василия Дренякина – родственника генерала-лейтенанта А.М. Дренякина. Позже, на месте деревянного дома, его сын Дмитрий построил в середине 19 века дом для своей семьи. А. П. Курчанинов – дворянин и мировой судья – стал владельцем дома только 10 мая 1905 г. Усадьба состояла из двух зданий: жилого дома и канцелярии, была расположена на углу улиц Разина (бывшая ул. Никольская) и Пушкина (бывшая ул. Батальонная) рядом с приходскими храмами Успенско-Николаевским и Покровским. Местоположение усадьбы Курчанинова в застройке ул. Пушкина играло важную роль, так как жилой дом замыкал композиционную ось улицы с южной стороны и «держал» угол застройки на пересечении ул. Разина и Пушкина. Именно поэтому в архитектурной композиции главного фасада присутствуют парадность и строгость одновременно.

Здание №17 представляет собой слободской индивидуальный одноэтажный жилой дом усадебного типа второй половины XIX века. Прямоугольный в плане, деревянный, с первоначальной каменной южной стеной и частично каменными перегородками с примыкающими к ним отопительными печами, на высоком каменном цокольном этаже. В цокольном этаже в южной половине дома размещались жилые помещения, остальная часть использовалась как хозяйственный подвал. Планировка первого этажа была анфиладно-зальная с продольным центральным коридором. В архитектурной композиции главного фасада акцентирующим элементом является четырехколонный дорический портик, каждая колонна кото-

рого поставлена на отдельную высокую базу. Завершен портик деревянным антаблементом и треугольным фронтоном с большим прямоугольным окном в центре.

Здание № 17А построено во второй половине 19 века южнее жилого дома Курчанинова. Представляет собой служебный корпус канцелярии мирового судьи Курчанинова. Здание «Г»-образное в плане, двухэтажное в основном объеме, боковое крыло одноэтажное. Первый этаж каменный, второй деревянный. Главный фасад на три оконных оси. Окна обрамлены штукатурными тянутыми наличниками. Стены оштукатурены и побелены, этажи отделены двумя полочками, углы первого этажа и внутренняя стена закреплены лопатками. Углы и внутренняя стена на втором этаже декорированы пилястрами, украшенными по всей высоте маленькими нишами. Стены фасадов завершены профилированным фризом и деревянным карнизом. Крыша четырехскатная. В интерьерах сохранились отопительные печи и лепной декор. На сегодняшний день оба сооружения являются объектами культурного наследия регионального значения и находятся в аварийном состоянии (рис. 1, 2).

В соответствии с законом Белгородской области от 13.11.2003 г. № 97 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) Белгородской области» и Положением об управлении культуры Белгородской области, утвержденным распоряжением правительства Белгородской области от 28.07.2006 г. № 90-рп, предметом охраны объекта культурного наследия регионального значения «Усадьба Курчанинова. Жилой дом», расположенный по адресу Белгородская область, г. Белгород, ул. Пушкина, 17 являются:

- объёмно-пространственная композиция прямоугольного в плане одноэтажного здания;
- высотные и силуэтные характеристики здания;
- количество, расположение и форма оконных проемов на главном фасаде;
- композиция архитектурно-художественного оформления главного (уличного) фасада: четырехколонный дорический портик (каждая колонна поставлена на отдельную базу, антаблемент и треугольный фронтоны с большим прямоугольным окном в центре).

Предметом охраны объекта культурного наследия регионального значения «Канцелярия мирового судьи Курчанинова» являются:

- объёмно-пространственная композиция «Г»-образного в плане двухэтажного здания;
- высотные и силуэтные характеристики здания;

- количество, расположение и форма оконных и дверных проемов на уличных фасадах;
- композиция архитектурно-художественного оформления уличных фасадов: штукатурные тянутые наличники оконных проемов; две междуэтажных полочки; лопатки, закрепляющие углы и внутреннюю стену первого этажа;

фасады жилого дома по ул. Пушкина, 17



фасады флигеля по ул. Пушкина, 17а

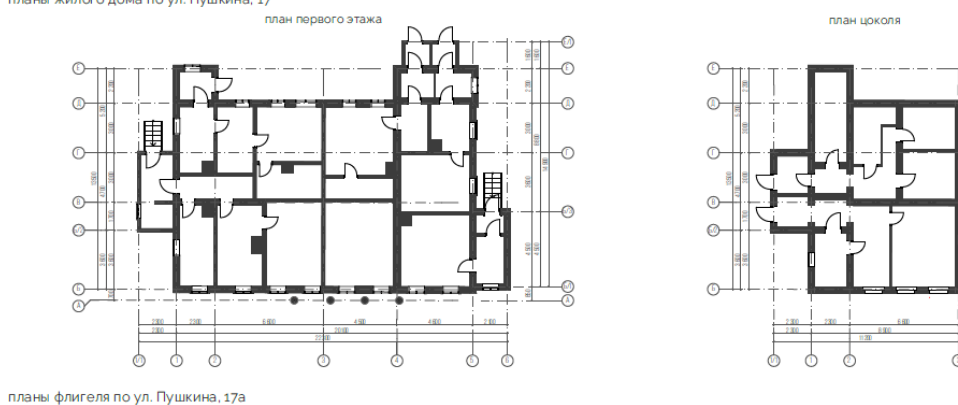


Рис. 1. Изучение исторической составляющей объекта культурного наследия. Фасады здания.

Сост. Дубино А.М. по архивным источникам и натурным обследованиям

существующее положение планировочной структуры

планы жилого дома по ул. Пушкина, 17



планы флигеля по ул. Пушкина, 17а

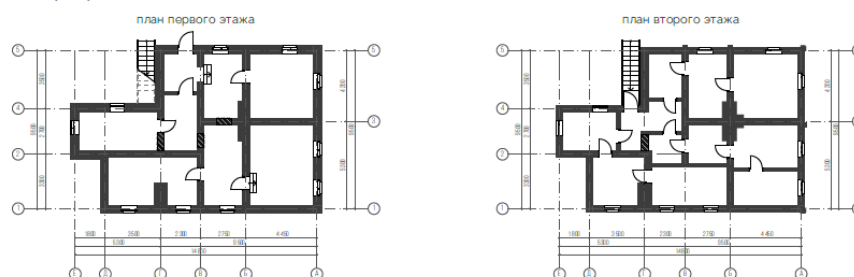


Рис. 2. Изучение исторической составляющей объекта культурного наследия. Поэтажные планы жилого дома и флигеля.

Позэтажные планы жилого дома и флигеля.

Сост. Дубино А.М. по архивным источникам и натурным обследованиям.

В результате социально-функционального приспособления памятников архитектуры регионального значения для современного использования должна сохраниться не только их историческая ценность, но и организована гармоничная пространственная среды на прилегающих к ним территориях [5,6]. Должны быть включены зеленые пространства как важные элементы городского планирования [7]. Также учтен принцип генетического градостроительного кода, который должен реализоваться в пространственных, архитектурных, стилевых морфологических параметрах [8]. Необходима интеграция планирования, развития и устойчивости экосистемы в единый процесс [9], а также создание комфортных функциональных пространств и эстетической среды [11]. Для улучшения качества жизни горожан большое значение имеет также развитие пешеходной инфраструктуры [12].

Проведен градостроительный и объемно-планировочный анализ объекта культурного наследия. Разработаны два варианта реконструкции с приспособлением для современного использования.

В статье представлен вариант реконструкции с приспособлением объекта под центр творчества. Центр предназначен для образования населения, развития творческого потенциала молодежи, досуга старших групп населения, приобщения к искусству горожан и гостей города. Общая планировка центра творчества представляет собой комплекс из трех блоков, два из которых являются объектами реконструкции и один – главный – объектом нового капитального строительства. Блок А представляет собой библиотеку, медиатеку, места для чтения и лекторий и предоставляет постоянный бесплатный доступ для жителей и гостей города. Блок Б представляет собой художественную и гончарную мастерские, пространства для коворкинга и деловых встреч с арендуемыми помещениями. Блок С включает

выставочное пространство, лектории, танцевальную студию, студию звукозаписи, фотостудию, театральную студию, арендуемый зал для переговоров. Адаптация коммуникационных пространств для реализации современных образовательных форм [12] позволит реализовать различные потребности населения. Блок С предусматривает размещение административных помещений, кафе на первом этаже и небольших зон отдыха (рис. 3, 4).

Для выявления эффективности принятых проектных решений, а также определения основного вектора развития территории, предлагается использовать комплексную балльную оценку проектов реконструкции с приспособлением объектов культурного наследия, которая была уточнена на основе. Оценка осуществляется по 3-х балльной шкале (от 0 до 3). Для каждого из критериев существует ряд вопросов, раскрывающих суть каждого из проектных решений (табл. 1). Уточнение существующей комплексной оценки заключается в корректировке критериев и разработке вопросов по каждому критерию (индикаторов), характеризующих то или иное проектное предложение по приспособлению ОКН. В частности, при оценке проектов по приспособлению объектов культурного наследия выявлено, что необходимо ввести критерий «Возрождение исторического наследия». По данному критерию предлагается ввести пять индикаторов:

1. Осуществляется ли восстановление целостной исторической среды?
2. Способствует ли проектное решение выявлению идентичности местной архитектурной среды?
3. Учитывается ли предмет охраны во всех этапах проектирования?
4. Полностью или частично отражает проектное решение первоначальные функции здания?
5. Обеспечивает ли проектное решение восстановление первоначальной объемно-планировочной структуры, экстерьера и интерьера ОКН?



Рис. 3. Фрагменты проектного предложения реконструкции с приспособлением ОКН «Усадьба Курчанинова». Разраб. Дубино А.М., Чечель И.Н.

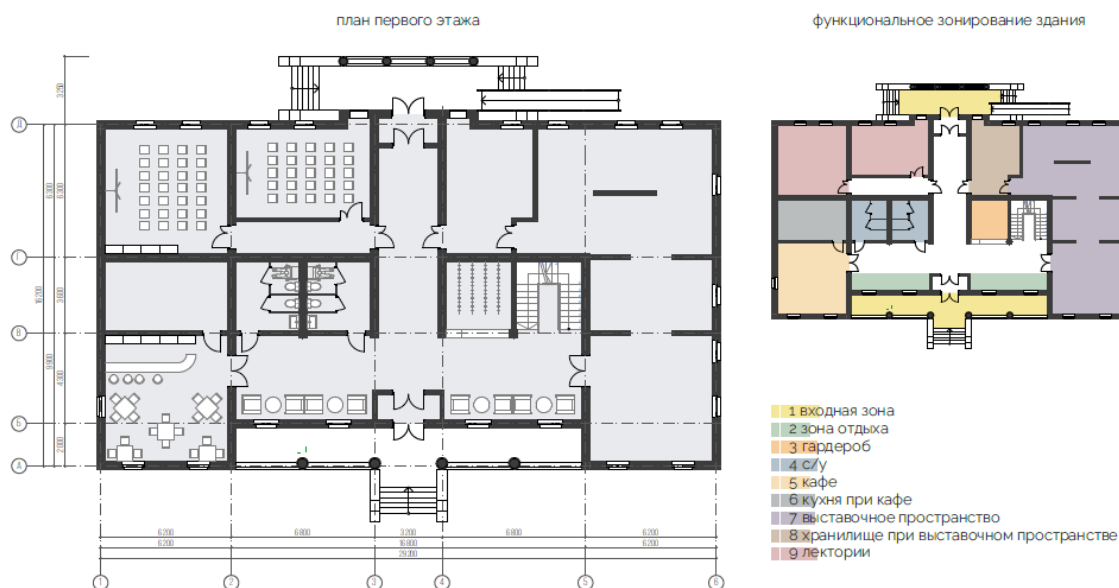


Рис.4. Фрагменты проектного предложения реконструкции с приспособлением ОКН «Усадьба Курчанинова». План первого этажа блока С. Разраб. Дубино А.М., Чечель И.Н.

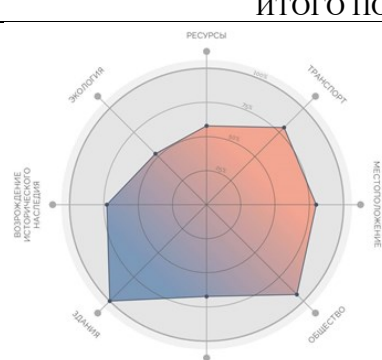
Также внесены уточнения и предложены новые индикаторы для оценки проектных решений

по критериям «ресурсы», «транспорт», «общество», «местоположение», «бизнес», «здания», «экология» (см. табл. 1).

Таблица 1

Комплексная балльная оценка по критериям проектного предложения реконструкции с приспособлением объектов культурного наследия под центр творчества

№	Критерии оценки	Вопросы по критериям/индикаторы	Баллы
1	Ресурсы	1.Задействована ли прилегающая территория в общей концепции	3
		2. Используются ли строительные и отделочные материалы местных производителей для реконструкции объектов адаптации?	2
		3. Предполагает ли использование вторичного сырья?	0
		4. Используются ли близлежащие заброшенные территории?	2
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	7
2	Транспорт	1. Имеется ли наличие остановок общественного транспорта не более чем 500 м от участка проектирования?	3
		2.Обеспечивается ли объект удобным подъездом для обладателей личного транспорта и количеством парковочных мест?	3
		3.Предполагает ли улучшение транспортной доступности посредством увеличения количества транспортных средств или изменения графика движения общественного транспорта?	1
		4.Предполагает ли улучшение пешеходной сети для доступа к проектируемому участку?	3
		5.Обеспечивает ли безопасность пешеходных и велосипедных маршрутов	2
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	12
3	Место положение	1.Поддерживает проектное решение ли историческую ценность?	
		2.Вносит ли функциональное разнообразие в район проектирования?	
		3.Предусматривается ли применение «бренда места»?	
		4.Создаются ли условия для устойчивого и преемственного развития территории?	
		5.Существуют ли точки притяжения для больших групп населения, в том числе и гостей города	
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	12

4	Общество	Удовлетворяет ли различные потребности всех групп населения (отдых, досуг, образование и др.)	3
		Сохраняет ли характер местной идентичности и укрепление местных связей общества?	2
		Создает ли условия для взаимодействия различных возрастных групп?	3
		Предусматривается ли обеспечение услугами социальной и социокультурной инфраструктуры?	3
		Является ли доступной для маломобильных групп населения?	3
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	14
5	Бизнес	1.Обеспечивает ли возможность создания новых пространств для бизнеса?	2
		2.Поддерживает ли существование розничной торговли и услуг	1
		3.Обеспечивает ли создание новых рабочих мест, в т.ч. на этапе строительства?	3
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	6
6	Здания	1.Предполагает ли восстановление (воссоздание) утраченных частей/элементов/ на территории объекта культурного наследия?	3
		2.Появляются ли новые объекты капитального строительства на территории, прилегающей к ОКН?	3
		3.Осуществляет эффективное использование объемно-планировочного и конструктивного потенциала адаптируемых объектов (зданий) под новую функцию?	3
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	9/9
7	Возрождение исторического наследия	1.Осуществляется ли восстановление целостной исторической среды	3
		2.Способствует ли проектное решение выявлению идентичности местной архитектурной среды?	2
		3. Учитывается ли предмет охраны во всех этапах проектирования?	3
		4. Полностью или частично отражает проектное решение первоначальные функции здания?	0
		5.Обеспечивает ли проектное решение восстановление первоначальной объемно-планировочной структуры, экстерьера и интерьера ОКН?	3
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	11
8	Экология	1.Сохраняется ли существующий природный каркас на прилегающей к ОКН территории?	
		2.Осуществляется ли достаточное видовое разнообразие в озеленении для обеспечения экологического баланса окружающей территории?	
		3.В достаточной ли степени предусмотрено озеленение территории объекта адаптации?	
		4.Предполагает использование альтернативных источников энергии?	
		5.Обеспечивается ли применение эффективных технологий, способствующих значительной экономии энергии?	
		ИТОГО ПО КРИТЕРИЮ	8
ИТОГО			

Выводы. Изучен ресурсный потенциал объекта культурного наследия регионального значения – здания канцелярии и городской усадьбы

мирового судьи Курчанинова в Белгороде как образца провинциального классицизма. Предло-

жены два варианта реконструкции с приспособлением под новые функции с учетом инвестиционной привлекательности объекта.

Предложено применение технология комплексной экологической оценки «Green Print» для анализа эффективности проектных предложений по приспособлению объектов культурного наследия для современного использования. Внесены уточнения в формулировки вопросов и предложены новые индикаторы для оценки проектных решений по критериям «ресурсы», «транспорт», «общество», «местоположение», «бизнес», «здания», «экология». Предложено введение дополнительного критерия при оценке проектных предложению по приспособлению объектов культурного наследия – «Возрождение исторического наследия» и разработаны пять индикаторов.

Проведена комплексная оценки эффективности разработанных проектных предложений по критериям объекта культурного наследия. Выявлено оптимальное концептуальное проектное предложение с приспособлением объекта под центр творчества. Центр предназначен для образования населения, развития творческого потенциала молодежи, досуга старших групп населения, приобщения к искусству горожан и гостей города. Это позволит сохранить объект культурного наследия, создать новые рабочие места, реализовать культурные и социальные проекты для различных групп потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Perkova M., Tsvetkova Y. Features of Sugar Mill Architectural and Industrial Heritage Preservation and Adjustment // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. № 4(53). Pp. 135–151. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15308
2. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области) // Диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры / Санкт – Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт – Петербург, 2019.
3. Perkova M.V, Baklazhenko E.V., Vaytens A.G. A Method for Identifying and Resolving Conflicts in Urban Riverside Development // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. № 459(5). 052024. DOI:10.1088/1755-1315/459/5/052024
4. Perkova M., Zaikina A. Historical peculiarities of formation of small town of Shebekino structure // *Architecture and Engineering*. 2016. №1(3). Pp. 18–23. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-3-18-23
5. Булавский С.В., Семенцов С.В. Подходы к определению категории "объект культурного наследия" в Российском правовом поле // В сборнике: Охрана и реставрация памятников культурного наследия. материалы Всероссийской научно-теоретической конференции. 2018. С. 12–16.
6. Сергеева Е.В., Семенцов С.В. Основные принципы нормативно-правового регулирования приспособления объектов культурного наследия для современного использования в Российском законодательстве. // Охрана и реставрация памятников культурного наследия. Материалы Всероссийской научно-теоретической конференции. 2018. С.138-140.
7. Wolch J.R., Byrne J.A., Newell J.P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities 'just green enough' // *Landscape and Urban Planning*. 2014. Vol. 125. Pp. 234–244. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.01.017
8. Семенцов С.В. Формирование принципов сохранения архитектурно-градостроительного наследия Санкт-Петербурга на основе закономерностей его трехвекового градостроительного развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2013. №2. С. 190–211.
9. Milojevic B. Integrated urban planning in theory and practice // *Савремена теорија и пракса у градитељству*. 2018. №13(1). Pp. 323–337. DOI:10.7251/STP1813323M
11. Çelikyay S. A Theoretical Framework on Retro-Fitting Process Based on Urban Ecology Sustainable Urbanization // *Sustainable Urbanization*. 2016. Pp. 252–267. DOI:10.5772/62904
12. Jackson L.E. The relationship of urban design to human health and condition // *Landscape and Urban Planning*. 2003. №64(4). Pp. 191–200. DOI:10.1016/S0169-2046(02)00230-X
13. Perkova M.V., Roshupkina O.E., Kolesnikova L.I., Vaytens A.G. The urban conflicts identification and resolution on the Belogorie reserve territory // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. №698(3), 033006. DOI:10.1088/1757-899X/698/3/033006
14. Kenworthy J. The eco-city: ten key transport and planning dimensions for sustainable city development // *Environment and Urbanization*. 2006. №18(1). Pp. 67–85. DOI:10.1177/0956247806063947

Информация об авторах

Чечель Ирина Николаевна, доцент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: Golden-Line7@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, советник РААСН, профессор, и.о. директора Высшей школы дизайна и архитектуры E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Дубино Анастасия Михайловна, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: anastuzi@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чечель Иван Павлович, ассистент кафедры архитектуры и градостроительства E-mail: golden-line7@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.02.2022 г.

© Чечель И.Н., Перькова М.В., Дубино А.М., Чечель И.П., 2022

¹*Chechel I.N.*, ^{2,3}**Perkova M.V.*, ¹*Dubino A.M.*, ¹*Chechel I.P.*

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

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Russia,*

³*Peoples' Friendship University of Russia*

**E-mail: Golden-Line7@yandex.ru*

RECONSTRUCTION WITH THE ADAPTATION OF THE OBJECT OF CULTURAL HERITAGE OF THE BUILDING OF THE OFFICE AND THE CITY ESTATE OF THE MAGISTRATE KURCHANINOV IN BELGOROD

Abstract. *The relevance of the topic is determined by the need to solve a set of problems related to the reconstruction of cultural heritage sites of regional significance with adaptation to modern use, taking into account investment attractiveness. The problem of preserving cultural heritage in a post-industrial society is due to the preservation of the memory of a place, its history and traditions. Preservation and restoration with the adaptation of cultural heritage sites to a new function preserves the urban identity, makes the urban environment unique and attractive to residents. The town-planning and space-planning analysis of the cultural heritage object is carried out with the aim of its reconstruction and adaptation for modern use. Options for reconstruction and adaptation have been developed. Decision options are justified by a comprehensive assessment for decision making. The list of criteria and questions for quantitative assessment have been specified specifically in relation to the process of reconstruction of a cultural heritage site. As a result of quantitative analysis, an objective result is obtained. It allows evaluating the effectiveness of the developed proposals from the standpoint of the population, authorities, business and other participants in urban development. The optimal conceptual design proposal has been identified. The proposed activities will help preserve the cultural heritage site, create new jobs, and implement cultural and social projects for various consumer groups.*

Keywords: *object of cultural heritage, reconstruction, adaptation, quantitative assessment, criteria*

REFERENCES

1. Perkova M., Tsvetkova Y. Features of Sugar Mill Architectural and Industrial Heritage Preservation and Adjustment. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. No. 4(53). Pp. 135–151. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15308
2. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noye razvitiye regional'noy sistemy rasseleniya i yeye elementov (na primere Belgorodskoy oblasti)]. Dissertation for the degree of Doctor of Architecture / St.

Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg, 2019. (rus)

3. Perkova M V, Baklazhenko E V, Vaytens A G A Method for Identifying and Resolving Conflicts in Urban Riverside Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. No. 459(5), 052024. DOI:10.1088/1755-1315/459/5/052024

4. Perkova M., Zaikina A. Historical peculiarities of formation of small town of Shebekino structure. *Architecture and Engineering*. 2016. No.1(3). Pp. 18–23. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-3-18-23

5. Bulavsky S.V., Sementsov S.V. Approaches to the definition of the category "object of cultural heritage" in the Russian legal field In the collection: Protection and restoration of cultural heritage monuments. [Podkhody k opredeleniyu kategorii "ob"yekt kul'turnogo naslediya" v Rossiyskom pravovom pole V sbornike: Okhrana i restavratsiya pamyatnikov kul'turnogo naslediya] materials of the All-Russian Scientific and theoretical Conference. 2018. Pp. 12–16. (rus)

6. Sergeeva E.V., Sementsov S.V. Basic principles of legal regulation of adaptation of cultural heritage objects for modern use in Russian legislation. Protection and restoration of cultural heritage monuments. [Osnovnyye printsipy normativno-pravogo regulirovaniya prispособleniya ob"yektov kul'turnogo naslediya dlya sovremennogo ispol'zovaniya v Rossiyskom zakonodatel'stve. Okhrana i restavratsiya pamyatnikov kul'turnogo naslediya] materials of the All-Russian Scientific and theoretical Conference. 2018. Pp. 138–140. (rus)

7. Wolch J.R., Byrne J.A., Newell J.P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities 'just green enough'. Landscape and Urban Planning. 2014. Vol. 125. Pp. 234–244. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.01.017

8. Sementsov S.V. Formation of the principles of preservation of the architectural and urban heritage of St. Petersburg on the basis of the regularities

of its three-century urban development [Formirovaniye printsipov sokhraneniya arkhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya Sankt-Peterburga na osnove zakonomernostey yego trekhvekovogo gradostroitel'nogo razvitiya]. Bulletin of St. Petersburg University. Art Criticism 2013. No.2. Pp. 190–211. (rus)

9. Milojevic B. Integrated urban planning in theory and practice. Modern theory and practice in the city of gradity. 2018. No. 13(1). Pp. 323–337. DOI:10.7251/STP1813323M

11. Çelikyay S. A Theoretical Framework on Retro-Fitting Process Based on Urban Ecology Sustainable Urbanization. Sustainable Urbanization. 2016. Pp. 252–267. DOI:10.5772/62904

12. Jackson L.E. The relationship of urban design to human health and condition. Landscape and Urban Planning. 2003. No. 64(4). Pp. 191–200. DOI:10.1016/S0169-2046(02)00230-X

13. Perkova M.V., Roshupkina O.E., Kolesnikova L.I., Vaytens A.G. The urban conflicts identification and resolution on the Belogorie reserve territory. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698(3), 033006. DOI:10.1088/1757-899X/698/3/033006

14. Kenworthy J. The eco-city: ten key transport and planning dimensions for sustainable city development. Environment and Urbanization. 2006. No. 18(1). Pp. 67–85. DOI:10.1177/0956247806063947

Information about the authors

Chechel, Irina N. Assistant Professor. E-mail: golden-line7@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia. Peoples' Friendship University of Russia. Miklukho-Maclay st., 6. Russia, Moscow, 117198

Dubino, Anastasia M. Master student. E-mail: anastuzi@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

Chechel, Ivan P. Assistant E-mail: golden-line7@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 08.02.2022

Для цитирования:

Чечель И.Н., Перькова М.В., Дубино А.М., Чечель И.П. Реконструкция с приспособлением объекта культурного наследия здания канцелярии и городской усадьбы мирового судьи Курчанинова в Белгороде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 52–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-52-60

For citation:

Chechel I.N., Perkova M.V., Dubino A.M., Chechel I.P. Reconstruction with the adaptation of the object of cultural heritage of the building of the office and the city estate of the magistrate Kurchaninov in Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 52–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-52-60

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-61-70

^{1,*}Самойлова Н.В., ²Кошелева О.Ю., ³Казанова Н.В.¹Институт архитектуры и строительства

Волгоградского государственного технического университета

²Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения

Российской академии наук

³Волгоградский государственный технический университет

*E-mail: n0013@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ И СЦЕНАРНЫЕ СТРАТЕГИИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РОСТА ВОЛГОГРАДА В АСПЕКТЕ УСТОЙЧИВОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Аннотация. Регрессирующее состояние озеленения Волгограда привело к ухудшению экологической ситуации в городе. В статье представлен результат анализа состояния «Зеленого кольца» Волгограда, являющегося базовым элементом зеленого каркаса города, и выявлены негативные факторы, которые в ближайшем будущем могут привести к его полному уничтожению. Цель проведенного исследования – спрогнозировать дальнейшее развитие ситуации и создать сценарные концепции, позволяющие не только сохранить «Зеленое кольцо» Волгограда, но и решить задачи градостроительного развития, создать предпосылки и векторы для устойчивого в экологическом аспекте градостроительного развития. Авторы провели анализ состояния и развития «Зеленого кольца» Волгограда, на основе которого предложили четыре сценария дальнейшей судьбы этого уникального образования. Сценарии условно обозначены как «регрессивный», «рекреационный», «инновационный» и «перспективный». В основе каждого из них лежит факт неизбежности поглощения зеленого пояса городской инфраструктурой вследствие роста городской застройки и расширения границ города. Однако дальнейшее развитие этого процесса в зависимости от складывающихся условий и предпринимаемых мер ведет к полярным результатам. Наиболее пессимистичный «регрессивный» сценарий заключается в полном исчезновении «Зеленого кольца» города в недалеком будущем. Другие сценарии предполагают развитие существующего «Зеленого кольца» как части внутригородской инфраструктуры, создание дублирующей его полосы лесонасаждений за чертой города, а также развитие в пределах «Зеленого кольца» экопоселений, превращающих его в экономически рентабельный проект.

Ключевые слова: защитные лесонасаждения, устойчивое развитие территорий, реконструкция, экопоселение.

Введение. Многие современные экологические проблемы городов связаны с игнорированием концепции зеленого пояса, возникшей в конце XIX – начале XX века на основе идеи социалиста-утописта Э. Говарда (Sir E. Howard) о развитии «городов-садов» в Англии. В литературе зеленый пояс (Green belt) определяется как полоса парков, окружающая застроенную часть крупного города, в пределах которой застройка ограничена [1–3].

Стремительные темпы урбанизации приводят к ухудшению экологической ситуации в городах, в частности эффект городского острова тепла (далее, теплового острова). Разработанная в 2015 году ООН Стратегия в области устойчивого развития на период до 2030 года, включает цели для устойчивых городов и поселений, содержащие действия по борьбе с изменением климата. Эти действия тесно связаны с организацией системы городских зеленых насаждений, развитие которых является одной из важнейших параметрических характеристик городского развития, качества экологической среды, обеспечивающих устойчивое развитие города [4–6].

Проблемами ценности городских лесов, развитием систем защитных зеленых насаждений сегодня занимаются ведущие научно-исследовательские институты мира, в частности: Научно-исследовательский институт глобального сообщества и изменения климата, Германия; Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Австрия; Центр совместных исследований университета Синсю, Япония; Центр глобальных экологических исследований (CGER) Национального института экологических исследований (NIES), Япония; Федеральный исследовательский и учебный центр по лесам, опасным природным явлениям и ландшафтам (BFW), Австрия; Пекинский университет лесного хозяйства, КНР; Шанхайская академия науки и планирования ландшафтной архитектуры, КНР и многие другие. Проводимые исследования посвящены изменениям пространственной эволюции зеленых насаждений городов и окружающих их территорий, с целью изучения влияния систем городского озеленения на снижение негативных экологических изменений. Тема воссоздания защитных зеленых насаждений

начинает приобретать звучание и в России. Федеральным законом № 353 от 03.07.2016 дополнен закон «Об охране окружающей среды», в изменениях прописан статус и необходимость организации «зеленых щитов» городов. Поэтому в последние годы в России появились научные публикации, посвященные возможным проектным вариантам «Зеленых поясов» (щитов, колец) городов. Однако, исследований по восстановлению существовавших с советского периода «Зеленых колец» (зеленых поясов) явно недостаточно. Статус этих территорий и их состояние в настоящее время вызывает большие опасения. Примером экологического регресса, вызванного разрушением зеленого пояса, является Волгоград. Город расположен на юго-востоке европейской части России, в зоне умеренно континентального засушливого пустынно-степного климата с недостаточным увлажнением. Природное окружение города до 1935 года представляло собой унылую картину – глубокие овраги, не имеющие растительности, развеиваемые ветрами пески и полынные степи. С началом активного промышленного развития в Волгограде (Сталинграде) в 20-х годах XX века проблема, связанная с необходимостью разработки мероприятий по защите от продуктов ветровой эрозии, вышла на первый план. В

1935 году принято решение о создании по наружному периметру линейного города «Зеленого кольца» – первой и самой значительной части зеленого каркаса городской территории [7]. Работы прервала Великая отечественная война, после которой уже в 1948 году начинается не только восстановление «Зеленого кольца», но и создание межрегиональной сети защитных лесных полос – крупнейшей программы улучшения эколого-климатической ситуации, реализованной на огромной территории [8, 9].

Период с 1992 по 2004 гг. характеризуется стихийным и бесконтрольным развитием городских территорий, смещением приоритетов в системе городского развития на рыночный аспект, отсутствием финансирования экологических мероприятий, направленных на поддержание и сохранение существующей системы озеленения. Это привело к губительным и невосполнимым потерям в структуре «Зеленого кольца», нарушению экологического благополучия урбанизированной и природной территории Волгограда. Постепенно, после 2004 года, процесс городского развития становится более упорядоченным, но элементы стихийности сохраняются вплоть до настоящего времени. Сложилось противоречие между необходимостью защиты города от неблагоприятных климатических факторов, для кото-

рой создавалось «Зеленое кольцо», и потребностью роста города, который вплотную подобрался к озелененной границе и стихийно поглощает её [8–10]. Несмотря на явную проблему, система взаимодействия города и зеленого пояса, возможности его преобразования изучены недостаточно. Высокая практическая востребованность в теоретическом обосновании концепции системы взаимодействия двух этих систем – природно-защитной и урбанизированной, – обусловила тему данного исследования. Объектом исследования является «Зеленое кольцо» Волгограда. Задачами исследования были: обобщение данных мониторинга современного состояния «Зеленого кольца»; выполнение анализа тенденций градостроительного развития Волгограда в корреляции с территориальным расположением «Зеленого кольца»; изучение степени реализации «Зеленым кольцом» задач экологической стабилизации и негативных климатических воздействий на урбанизированную городскую среду Волгограда; проработка вариантов концепций - сценариев, позволяющих сохранить и обеспечить стабильное устойчивое развитие территорий города и «Зеленого кольца» Волгограда.

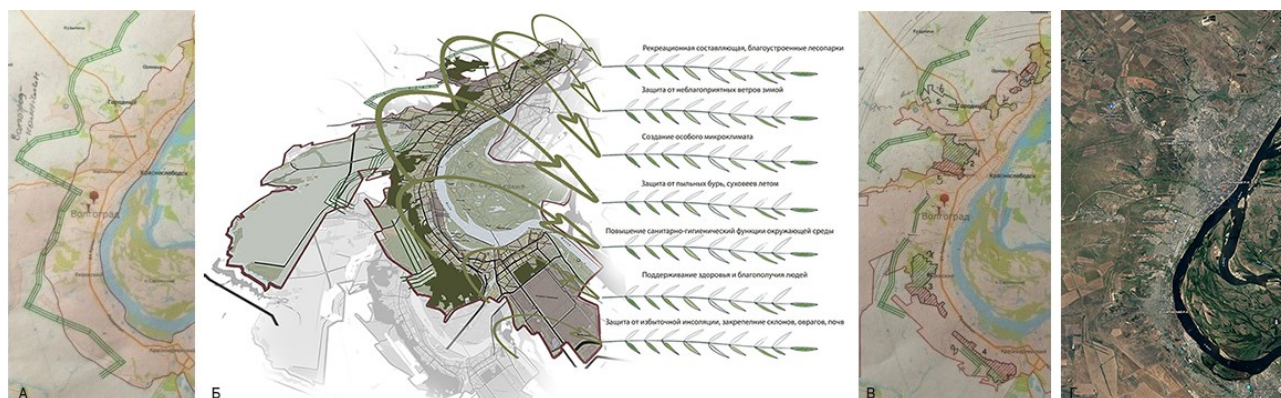
Материалы и методы. При проведении анализа современного состояния «Зеленого кольца» Волгограда, оценки качественного состояния зеленых насаждений использовались методы натурного обследования территории, в том числе фотофиксация неблагоприятных явлений. Для выявления изменения пространственной структуры зеленого пояса применялись методы дистанционной оценки урболандшафтов по космическим снимкам высокого разрешения [9].

Среднесуточная температура по метеостанции Волгоград приводится по данным Автоматизированной информационной системы обработки режимной информации (АИСОРИ) Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>). Максимальная температура земной поверхности Волгограда в июле представлена по данным информационного продукта температуры поверхности земли MODIS [11].

При разработке вариантов концепции взаимодействия развивающейся городской структуры с зеленым поясом Волгограда использовались методы комплексного градостроительного анализа, сценарный метод вариантного моделирования, а для выявления наиболее активных территорий взаимодействия – параметрическое, модельное проектирование [12–17].

Основная часть. «Зеленое кольцо» Волгограда на сегодняшний день фактически уничтожено. Оставшиеся массивы зеленых насаждений в силу территориальной разобщенности и бедственного состояния практически не выполняют

свою защитную функцию в масштабе города. На рисунке 1 показаны исходный вид «Зеленого кольца» в период 1960–1995 гг., функции, которые оно выполняло, и современный вид, представленный схемой и спутниковой съемкой.



В ходе исследования были определены основные факторы дестабилизации зеленого пояса Волгограда:

1. Отсутствие ухода, полива, обработки от болезней и вредителей, регулярных санитарных рубок привело к массовой деградации насаждений. К этому добавляется нарушение процессов поверхностного и подземного стока вследствие засыпки и застройки овражно-балочной сети, начавшейся в 1960-х гг. и продолжающейся до сих пор. Помимо прямого уничтожения лесной растительности по склонам и днищам балок, нарушается система грунтового питания древес-

ной растительности, так необходимая ей в тяжелых лесорастительных условиях засушливой зоны.

2. Недостаток финансирования лесоохранной деятельности, сокращение штатов работников лесничеств, а, главное, пробелы в законодательстве, приводят земли «Зеленого кольца» в регрессивное состояние. Неопределенность правового статуса зеленого пояса приводит к регулярному отчуждению муниципальными властями его земель под строительство. Так, в 2012 г. в результате деятельности муниципальных властей город лишился около 700 га ценных лесных земель [9].

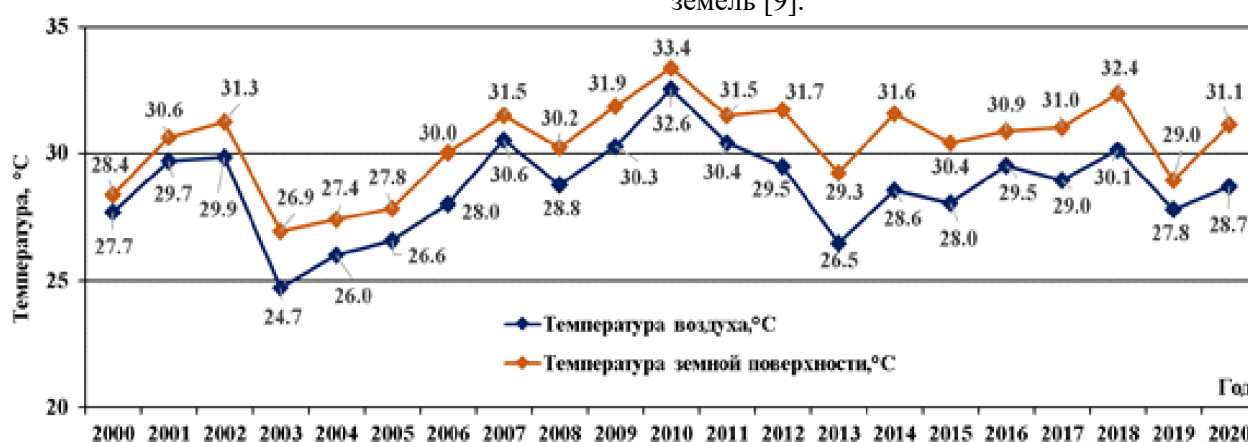


Рис. 2. Изменение температуры воздуха и земной поверхности в Волгограде в 2000–2020 гг.

Иметь зеленый пояс для крупного города сегодня необходимо в силу глобального изменения климата. На рисунке 2 представлены колебания температуры воздуха и земной поверхности в

июле в Волгограде за период 2000–2020 г. Известно, что существует ярко выраженная отрицательная корреляция между зеленой массой растительности и температурой земной поверхности [19]. Увеличение площади зеленых насаждений в

городе ведет к снижению температуры земной поверхности в летний период, которая, как следует из графика, всегда на несколько градусов выше температуры воздуха [11]. С уменьшением температуры земной поверхности в общегородских масштабах повышается степень комфортности среды для горожан [3, 10]. Однако этот фактор никак не учитывается местными властями в принятии управленческих решений на долгую перспективу.

Следствием масштабной деградации насаждений зеленого пояса Волгограда являются, во-первых, увеличение пожароопасности территорий «Зеленого кольца» из-за наличия несанкционированных свалок мусора и обилия погибших растений, превратившихся в сушняк; во-вторых, распространение болезней и вредителей с погибающих насаждений зеленого пояса на зеленые массивы частного сектора, дачных и садовых кооперативов, городское озеленение [8, 12, 15]. Таким образом, к настоящему времени «Зеленое кольцо» Волгограда не только перестало выполнять свои защитные функции, но и превратилось в экологическую угрозу для города.

На основании изученных аспектов текущего состояния «Зеленого кольца» и современных тенденций разрастания города следует признать необходимость разработки мероприятий по взаимодействию городской инфраструктуры с зеленым поясом, исходя из неизбежности его поглощения городской застройкой [9, 12, 14, 15, 17].

Рассмотрим основные сценарии событий в современных условиях.

Сценарий 1, регрессивный. «Зеленое кольцо» исчезнет в урбанизированной среде без следа, вследствие чего среднегодовая температура городской среды вырастет, а новое поколение жителей города узнает, что такое пыльная и песчаная бури. Это вполне реальный сценарий, основанный на тенденциях поверхностно-рыночного подхода к городскому развитию. Сложно говорить о прибыли или даже окупаемости работ по лесоразведению в условиях полупустынной степи. В 1962 году, в пору расцвета существования зеленого пояса, с 1 га плодовых садов собирали 3 тонны вишни или 6,5 тонн яблок [7]. Исходя из этого, можно предположить заметный экономический эффект от сбора и переработки урожая только в случае, если от общей площади «Зеленого кольца» (6,8 тыс. га) не менее четверти будет засажено плодовыми садами. Но для этого нужна серьезная модернизация инженерной инфраструктуры и налаживание систем сбора и переработки урожая. С точки зрения инвесторов, проще и прибыльнее отдать эти земли под застройку.

Сценарий 2, рекреационный, предполагает включение «Зеленого кольца» в градостроительную структуру в виде системы линейных садово-парковых ландшафтов. Это обеспечит примерно 60 %-ный уровень защиты города от песка и пыли и, одновременно, создаст новые места для отдыха горожан. Данный сценарий требует серьезной реконструкции «Зеленого кольца», так как в его структуре не предусмотрена система благоустройства. Бремя обслуживания системы будет лежать на муниципалитете, что при существующем подходе к городскому управлению экономически неэффективно. Обслуживание городских парков и озелененных территорий в Волгограде передаются частным структурам, что не может не влиять на качество ухода за этими территориями.

Сценарий 3, инновационный. Предлагается осуществлять поддержание и реконструкцию сохранившихся частей «Зеленого кольца» с помощью включения в них системы модульных экопоселений. Главной характеристикой модульного поселения является возможность его трансформации. В состав поселения входят базовые модули – соты, представляющие правильный шестиугольник. Сота делится на треугольные подмодули, для каждого из которых предусмотрено 12 вариантов функционального заполнения с возможностью сочетаний подмодулей в различных комбинациях. Данная система предполагает практически бесконечное число сочетаний, обеспечивая разнообразие планировочных решений при существенной экономии затрат на проектирование.

Второй важнейшей особенностью поселений является принцип экологичности, реализуемый в самодостаточной, замкнутой инженерной системе жизнедеятельности поселения: в каждое поселение включены блоки утилизации и переработки отходов и энергетический блок с использованием экологически чистых технологий получения электроэнергии. Третья особенность предлагаемой системы модульных поселений – их самоокупаемость на основе деятельности по обслуживанию и получению дохода от эксплуатации насаждений «Зеленого кольца». Из приведенных выше показателей урожайности очевидно, что данное направление деятельности будет эффективным. Каждое из модульных поселений обслуживает определенный участок «Зеленого кольца», в том числе проводя работы по лесовосстановлению. Для ведения деятельности модульных поселений предполагается выделение сельскохозяйственных территорий на западных границах города, непосредственно прилегающих к зеленому поясу. Предложенный вариант разделяет зоны ответственности за защитный пояс

между экопоселениями и решает вопрос само-окупаемости зеленой инфраструктуры города. На

рисунке 3 показан пример реализации данного сценария.



Рис. 3. Сценарный план развития «зеленого кольца» Волгограда.

А – главные направления роста городской инфраструктуры; Б – пример включения модульных поселений в структуру «зеленого кольца» Волгограда; В – пример структуры базового модуля поселения

Сценарий 4, перспективный, предусматривает формирование нового витка озеленения внешних границ Волгограда, как показано на рисунке 4. Он может быть реализован как дополнительный к любому другому сценарию. В первом случае это будет новый защитный пояс взамен уничтоженного «Зеленого кольца», во втором и третьем случае – дублер, дополнительная защита. Второй зеленый пояс также позволит решить ряд градостроительных проблем. Например, снять

потребность в территориях для развития малоэтажного индивидуального жилищного строительства низкой плотности (предложенные в третьем сценарии модульные поселения станут основой его инфраструктуры), обеспечение города внегородскими, но обслуживаемыми и безопасными рекреационными территориями, развитие сельского и лесного хозяйства в городской черте и т.д.

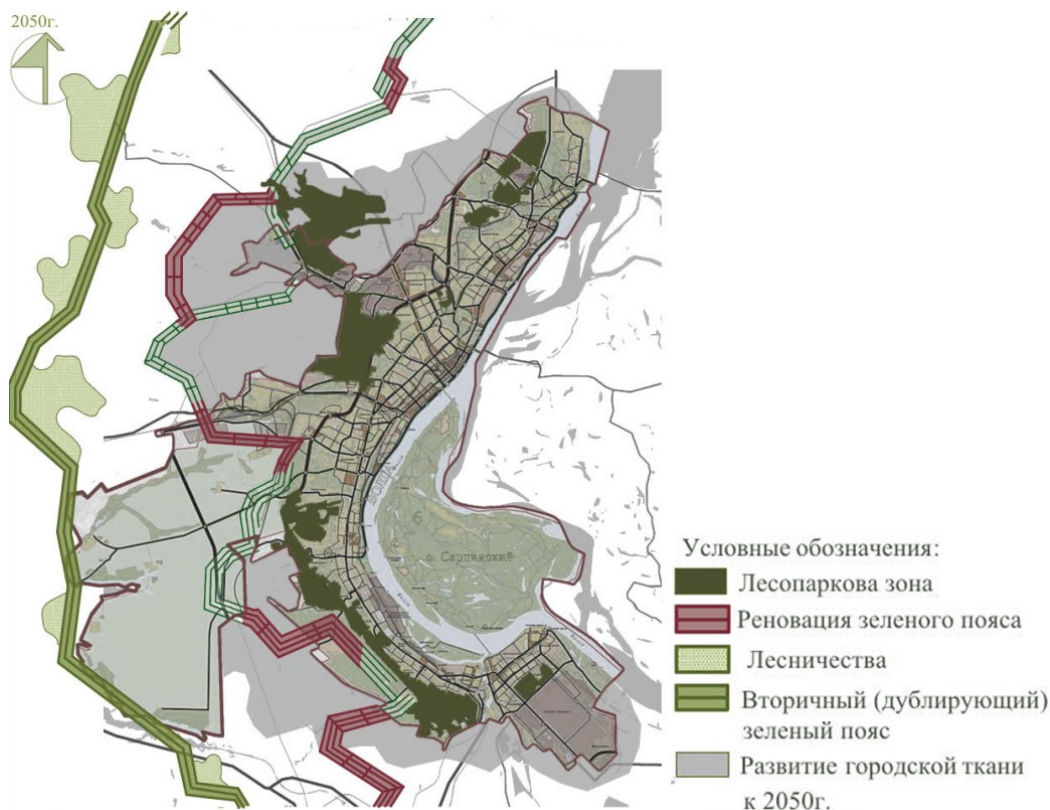


Рис. 4. Система структуры «зеленых колец» Волгограда – перспективный сценарий развития

Выводы. Проведенный анализ состояния «Зеленого кольца» Волгограда позволил констатировать факт его практического уничтожения как культурно-исторического объекта и памятника советской эпохи лесоразведения. Его площадь и состояние зеленых насаждений в настоящее время не позволяют выполнять ту экологическую защитную функцию, для которой оно было создано. Наше исследование показало, что продолжение существующего тренда отношения к «Зеленому кольцу» Волгограда, усугубит выявленные негативные тенденции экологического регресса города, в частности: увеличение эффекта теплового острова, повышение пожароопасности городских территорий, рост заболеваний горожан (в особенности влияния на прогрессирование заболеваний дыхательных и сердечно-сосудистых систем). Выявлено, что в настоящее время организации работ по поддержанию и восстановлению «Зеленого кольца» препятствует: отсутствие проектных предложений по его развитию и сохранению; экономическая неэффективность территорий в краткосрочной перспективе; высокая линейная протяженность «Зеленого кольца»; реорганизация структур, отвечающих за обслуживание территорий «Зеленого кольца» (сведение численности работников и техники практически к нулю, что обуславливает невозможность исполнения ими функций ухода за «Зеленым кольцом»); халатное отношение органов управления к негативным тенденциям экологической ситуации в городе.

Для изучения возможностей стабилизации городской экологии, снижение эффекта городского теплового острова, при обеспечении устойчивого городского развития, мы применили сценарный подход. Такой подход позволил нам учесть максимально широкий комплекс факторов и выполнить прогностический анализ развития ситуации. Предложенные сценарии: 1 – *регрессивный*; 2 – *рекреационный*; 3 – *инновационный*; 4 – *перспективный*, рассматривают варианты развития урбанизированных территорий в корреляции с трансформацией «Зеленого кольца» Волгограда. В разработанных сценариях были учтены следующие факторы: 1) тенденции векторов градостроительного роста территорий (пиковые точки разрывов «Зеленого кольца»); 2) возможные направления градостроительной и экологической политики города и региона; 3) участие Волгограда в федеральных программах экологического развития; 4) привлечении инвестиций для обеспечения территориального экологического развития города. На наш взгляд, наиболее перспективным является сценарий № 3, включающий обживание «Зеленого кольца» си-

стемой модульных экопоселений, которые обеспечат уход и мониторинг за «Зеленым кольцом» Волгограда. Сценарий № 3 позволяет обеспечить разумную урбанизацию, при которой Волгоград перерастет свое прежнее «Зеленое кольцо» и пойдет развиваться дальше, сохранив значительную часть своей зелёной экологической защиты. Важным аспектом этого сценария является реализация экономической самоокупаемости территории «Зеленого кольца». Несмотря на наше предпочтение сценария № 3, нами рассмотрены возможности совмещения сценариев урбанизированного развития, обеспечивая реализацию различных направлений градостроительной политики. Предусмотрена как фрагментарно-территориальная так и хронологическая интеграция сценариев.

Предложенный комплекс эволюционных сценариев трансформации «Зеленого кольца» Волгограда позволит обеспечить гибкое планирование развития городских пространств, корректировку механизмов управления в определении стратегий потенциального расширения города, разработку будущей политики экологической защиты Волгограда на долгосрочный период. Кроме этого, опыт использования сценарного подхода будет полезен при решении аналогичных градостроительных проблем сохранения «Зеленых поясов» (зеленых колец) для других развивающихся городов и поселений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Amati M., Teylor L. From green belts to green infrastructure // *Planning Practice and Research*, 2010. Vol. 25(2). Pp. 143–155. DOI: 10.1080/02697451003740122
2. Tang B., Wong S., Lee A. K. Green belt in a compact city: A zone for conservation or transition? // *Landscape and Urban Planning*. 2007. No 79(3). Pp. 358–373. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2006.04.006
3. Huang B.-X., Chiou S.-C., Li W.-Y. Landscape Pattern and Ecological Network Structure in Urban Green Space Planning: A Case Study of Fuzhou City // *Land*. 2021. No. 10. 769. DOI: 10.3390/land10080769
4. Southon G.E., Jorgensen A., Dunnett N., Hoyle H., Evans K.L. Perceived species-richness in urban green spaces: cues, accuracy and well-being impacts // *Landsc. Urban Plan.* 2018. Vol. 172. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.12.002
5. Hwang Y.H., Yue Z.E.J., Ling S.K., Tan H.H.V. It's ok to be wilder: Preference for natural growth in urban green spaces in a tropical city // *Urban For. Urban Green*. 2019. Vol. 38. Pp. 165–176. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.12.005

6. Diluiso F., Guastella G., Pareglio S. Changes in urban green spaces' value perception: a meta-analytic benefit transfer function for European cities // *Land Use Policy*. 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105116
7. Годунов Ю.Н., Грачев А.Г., Калашников А.Ф. Зеленое кольцо. Опыт создания лесопарковых насаждений и садов вокруг Волгограда. Волгоград: Нижне-Волжск. кн. изд., 1964. 102 с.
8. Анопин В.Н., Солодовников Д.А., Степанова Е.А. Адаптивно-ландшафтные технологии восстановления и преобразования насаждений Зеленого кольца г. Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 138–150.
9. Березовикова О.Ю. Экологическая оценка и картографирование агролесоландшафтов урбанизированных территорий (на примере г. Волгограда): дис. канд. с-х. наук. Волгоград, 2009. 180 с.
10. Sidorenko V., Balakin V., Antyufeyev A., Kuznetsov G. Gas-protective efficiency of strips of green plantings on objects of transport infrastructure. // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 138. 6 p. International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development” (CATPID-2019). DOI 10.1051/e3sconf/201913801033 [Электронный ресурс]. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/64/e3sconf_catpid18_01033.pdf (дата обращения: 01.11.21)
11. Шинкаренко С.С., Кошелева О. Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 125–141.
12. Ivanova N., Ganzha O., Prokopenko V. Methodology of planning of landscape and ecological sustainability of natural components in the virtual model (on the example of Volgograd) // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. 10 p. International Science Conference SPbWOSCE-2017 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”. DOI: 10.1051/matecconf/201817004012 [Электронный ресурс]. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/29/matecconf_spbwosce2018_04012.pdf (дата обращения: 01.11.21)
13. Ишмаматов Р.Х., Самойлова Н.В. Принципы архитектурно-планировочной организации автономных жилых комплексов нефтегазовой отрасли // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 7 (58). [Электронный ресурс]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6083> (дата обращения: 01.11.21)
14. Krasilnikova E.E., Klimov D.V. The Main Design Principles of Hybrid Spaces in Terms of the Urban Planning Regeneration // *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2016. No. 4. Pp. 63–74. DOI: 10.22363/2312-797X-2016-4-63-74
15. Матовников С.А., Анопин В.Н., Матовникова Н.Г. Ландшафтно-архитектурные методы в зеленом строительстве Волгоградской агломерации // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 36(55). С. 248–257.
16. Matovnikov S.A., Matovnikova N.G. Innovative Urban Planning Methods for the Urban Landscape Design in the Volgograd Agglomeration. // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1966–1971. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.199
17. Прокопенко В. В., Плешаков И. Н. Формирование функциональных связей города с пригородной зоной на примере Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 313–322.
18. Куда делись лесные земли Волгограда? // Центр защиты леса Волгоградской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://volgograd.rcfh.ru/news/4269.html> (дата обращения: 01.11.21)
19. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89(4). Pp. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.

Информация об авторах

Самойлова Наталья Владимировна, доцент кафедры «Урбанистика и теория архитектуры». E-mail: n0013@mail.ru. Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета. Россия, 400001, Волгоград, ул. Академическая, д. 1.

Кошелева Ольга Юрьевна, кандидат сельскохозяйственных наук E-mail: olya_ber@mail.ru. Лаборатория геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН. Россия, 400062, Волгоград, пр-кт Университетский, д. 97.

Казанова Наталия Витальевна, кандидат философских наук, доцент кафедры «Философия и право». E-mail: nvk-work@yandex.ru. Волгоградский государственный технический университет. Россия, 400005, Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, д. 28.

Поступила 03.11.2021 г.

© Самойлова Н.В., Кошелева О.Ю., Казанова Н.В., 2022

^{1,*}*Samoilova N.V.*, ²*Kosheleva O.Yu.*, ³*Kasanova N.V.*

¹*Institute of Architecture and Construction, Volgograd State Technical University*

²*Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences*

³*Volgograd State Technical University*

*E-mail: n0013@mail.ru

PROBLEMS AND SCENARIO STRATEGIES FOR THE URBAN DEVELOPMENT OF VOLGOGRAD IN THE ASPECT OF SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT

Abstract. *The regressing of Volgograd's landscaping has led to a deterioration of the ecological situation in the city. The analysis of the Green Ring of Volgograd is presented in the article. The Green ring is basic element of the green frame of the city. It reveals negative factors that in the near future may lead to its complete destruction. The purpose of the study is to predict the further development of the situation and to create scenario concepts that will preserve the Green Ring, to solve the problems of urban development, to create prerequisites and vectors for sustainable urban development in the ecological aspect. The authors analyze the state and development of the Green Ring in Volgograd. They proposed four scenarios for the further fate of this unique formation. The scenarios are conventionally designated as "regressive", "recreational", "innovative" and "promising". Each scenario is based on the inevitability of absorption of the green belt by urban infrastructure due to the growth of urban development and the expansion of the city's boundaries. However, the further development of this process, depending on the prevailing conditions and the measures taken, leads to polar results. The most pessimistic "regressive" scenario is the complete disappearance of the city's Green Ring in the near future. Other scenarios imply the development of the existing Green Ring as part of the urban infrastructure, the creation of a forest belt duplicating it outside the city limits, as well as the development of ecovillages within the Green Ring, turning it into an economically viable project.*

Keywords: *protective forest plantations, sustainable development of territories, reconstruction, ecovillage.*

REFERENCES

1. Amati M., Teylor L. From green belts to green infrastructure. Planning Practice and Research. 2010. Vol. 25(2). Pp. 143–155. DOI: 10.1080/02697451003740122
2. Tang B., Wong S., Lee A. K. Green belt in a compact city: A zone for conservation or transition? Landscape and Urban Planning. 2007. No 79(3). Pp. 358–373. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2006.04.006
3. Huang B.-X., Chiou S.-C., Li W.-Y. Landscape Pattern and Ecological Network Structure in Urban Green Space Planning: A Case Study of Fuzhou City. Land. 2021. No. 10. 769. DOI: 10.3390/land10080769
4. Southon G.E., Jorgensen A., Dunnett N., Hoyle H., Evans K.L. Perceived species-richness in urban green spaces: cues, accuracy and well-being

impacts. Landsc. Urban Plan. 2018. Vol. 172. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.12.002

5. Hwang Y.H., Yue Z.E.J., Ling S.K., Tan H.H.V. It's ok to be wilder: Preference for natural growth in urban green spaces in a tropical city. Urban For. Urban Green. 2019. Vol. 38. Pp. 165–176. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.12.005

6. Diluiso F., Guastella G., Pareglio S. Changes in urban green spaces' value perception: a meta-analytic benefit transfer function for European cities. Land Use Policy. 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105116

7. Godunov Yu.N., Grachev A.G., Kalashnikov A.F. Green belt. An experience in the creating forest parks and gardens around Volgograd [Zelenoe kol'co. Opyt sozdaniya lesoparkovykh nasazhdenij i sadov vokrug Volgograda]. Volgograd: Nizhne-Volzhsk. kn. izd., 1964. 102 p. (rus)

8. Anopin V.N., Solodovnikov D.A., Stepanova E.A. Adaptive and landscape technologies for the restoration and transformation of the plantations of the green belt of the city of Volgograd. [Adaptivno-landshaftnye tekhnologii vosstanovleniya i preobrazovaniya nasazhdenij Zelenogo kol'ca g. Volgograda]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2019. Iss. 1. Pp. 138–150. (rus)
9. Berezovikova O.Yu. Ecological assessment and mapping of agro-forestry landscapes of urbanized territories (on the example of Volgograd): dis. cand. agr. sciences. [Ekologicheskaya ocenka i kartografirovaniye agrolesolandshaftov urbanizirovannykh territorij (na primere g. Volgograda): dis. kand. s-h. nauk] Volgograd, 2009. 180 p. (rus)
10. Sidorenko V., Balakin V., Antyufeyev A., Kuznetsov G. Gas-protective efficiency of strips of green plantings on objects of transport infrastructure. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 138. 6 p. International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development” (CATPID-2019). DOI 10.1051/e3sconf/201913801033 URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/64/e3sconf_catpid18_01033.pdf (date of treatment: 01.11.21)
11. Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S. Analysis of the influence of soil cover and greening on the temperature field of the Volgograd agglomeration according to MODIS data [Analiz vliyaniya zapechatannosti pochvennogo pokrova i ozeleneniya na pole temperatur Volgogradskoj aglomeracii po dannym MODIS]. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. Vol. 17. No. 5. Pp. 125–141. (rus)
12. Ivanova N., Ganzha O., Prokopenko V. Methodology of planning of landscape and ecological sustainability of natural components in the virtual model (on the example of Volgograd). MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 170. 10 p. International Science Conference SPbWOSCE-2017 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”. DOI: 10.1051/mateconf/201817004012 URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/29/mateconf_spbwosce2018_04012.pdf (date of treatment: 01.11.21)
13. Ishmametov R.H., Samojlova N.V. Principles of the architectural and planning organization of autonomous residential complexes of the oil and gas industry [Principy arhitekturno-planirovochnoj organizacii avtonomnykh zhilykh kompleksov neftegazovoj otrasli]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. No. 7 (58). URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6083> (date of treatment: 01.11.21) (rus)
14. Krasilnikova E.E., Klimov D.V. The Main Design Principles of Hybrid Spaces in Terms of the Urban Planning Regeneration. RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2016. No. 4. Pp. 63–74. DOI: 10.22363/2312-797X-2016-4-63-74
15. Matovnikov S.A., Anopin V.N., Matovnikova N.G. Landscape and architectural methods in green building of the Volgograd agglomeration [Landshaftno-arhitekturnye metody v zelenom stroitel'stve Volgogradskoj aglomeracii]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2014. No. 36(55). Pp. 248–257. (rus)
16. Matovnikov S.A., Matovnikova N.G. Innovative Urban Planning Methods for the Urban Landscape Design in the Volgograd Agglomeration. Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1966–1971. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.199
17. Prokopenko V.V., Pleshakov I.N. Formation of functional links of the city with the suburban area on the example of Volgograd. [Formirovanie funkcional'nykh svyazej goroda s prigorodnoj zonoj na primere Volgograda]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2021. Iss. 1. Pp. 313–322 (rus).
18. Where have the forest lands of Volgograd gone? [Kuda delis' lesnye zemli Volgograda?] URL: <http://volgograd.rcfh.ru/news/4269.html> 2016 (date of treatment: 12.09.2021) (rus)
19. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89(4). Pp. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.

Information about the authors

Samoilova, Natalia V. Associate professor. E-mail: n0013@mail.ru. Institute of Architecture and Construction of Volgograd State Technical University. Russia, 400001, Volgograd, st. Academic, 1.

Kosheleva, Olga Y. PhD. E-mail: olya_ber@mail.ru. Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes (Volgograd). Russia, 400062, Volgograd, Prospect University, 97.

Kazanova, Natalia V. PhD. E-mail: nvk-work@yandex.ru. Volgograd State Technical University Volgograd. Russia, 400005, Volgograd, avenue Lenin, 28.

Received 03.11.2021

Для цитирования:

Самойлова Н.В., Кошелева О.Ю., Казанова Н.В. Проблемы и сценарные стратегии градостроительного роста Волгограда в аспекте устойчивого экологического развития // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 61–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-61-70

For citation:

Samoilova N.V., Kosheleva O.Yu., Kasanova N.V. Problems and scenario strategies for the urban development of Volgograd in the aspect of sustainable environmental development. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 61–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-61-70

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-71-80

¹Колесникова Л.И., ^{2,3,*}Перькова М.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого³Российский университет Дружбы Народов

*E-mail: perkova.margo@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ОХРАНЫ ДЛЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ТИПА «ЖИЛЫЕ ДОМА» – «ДОМ ЖИЛОЙ НА ПОГРЕБАХ» В Г.БЕЛГОРОДЕ

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы, связанные с определением предмета охраны объектов культурного наследия для типа «жилые дома», характерных для городских (в том числе пригородных) центров городской застройки. Цель исследования - обоснование принятия решения о целесообразности включения выявленного объекта культурного наследия «Дом жилой на погребках» в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации и определения категории историко-культурного значения. В результате рассмотрения представленных документов и проведенных исследований составлена историческая справка о застройке г. Белгорода и выявленном объекте культурного наследия «Дом жилой на погребках». Объект культурного наследия «Дом жилой на погребках» представляет собой градостроительный элемент, формирующий застройку одной из улиц городского центра Белгорода - пр. Славы, а также является образцом, характерным для периода раннего классицизма и может быть отнесен к одному из «образцовых проектов», разработанных для застройки городов в XVIII веке, представляющих собой историко-культурную ценность. Предложены предметы охраны для данного типа «жилые дома» с учетом их особенностей, расположения в городской среде, композиционной составляющей, объемно-пространственного решения и стилистических характеристик.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, предметы охраны объекта культурного наследия, объемно-пространственная композиция, жилые дома, архитектурная стилистика.

Введение. Понятие "предмет охраны" является ключевым при определении границ допустимого вмешательства при ремонте и приспособлении памятника к современному использованию. Работы на памятнике допускаются "без изменения его особенностей, составляющих предмет охраны" [1, 2]. Тем же условием определяется и право пользования памятником для юридических и физических лиц. Содержанием предмета охраны определяются те обязанности, которые государство налагает на арендатора или собственника. Таким образом, именно состав и содержание предметов охраны в каждом конкретном случае служит гарантией сохранения памятника.

"Предмет охраны" – понятие достаточно новое для нашего законодательства, оно только начинает массово применяться. Чтобы полностью сформировать предмет охраны объекта недвижимости, необходимо выявить основные его качественные характеристики. Для этого необходимо рассмотреть объект с точки зрения архитектуры, градостроительства, истории, археологии, эстетики, искусства, науки и техники, этнологии или антропологии и социальной культуры [3]. Категория «объект культурного наследия» должна раскрываться с позиций ее корреляционных связей с понятием «культурные ценности»

[4]. Для сохранения объекта культурного наследия необходимо в полном объеме иметь предметы охраны данного объекта, так как они характеризуют его особенности и ценность. Целью определения предмета охраны является сохранение индивидуальных особенностей объемно-планировочного решения здания, дошедших до нашего времени либо от первоначального замысла архитектора, либо как результат определенного исторического этапа его существования [3]. Предмет охраны является определенной степенью защиты объекта культурного наследия. На сегодняшний день федеральные программы и общественные фонды способствуют сохранению объектов культурного наследия народов Российской Федерации, дают возможность не только воссоздать первоначальную функцию объекта, но и приспособить его для современного использования.

В связи с тем, что на территории Белгородской области сохранилось достаточно мало объектов архитектурного наследия, исследования по выявлению ОКН, определению предметов охраны сохранившихся объектов являются очень важными и актуальными [5]. Именно специалист в конечном итоге принимает решение о том, что

хорошо для объекта или какие изменения приведут к изменению ценностных характеристик объекта [6, 7].

Материалы и методы.

Как правило, в такого рода исследованиях используют изучение исторических документов (в том числе графических (планы, архитектурные проектные и фиксационные чертежи и т.п.); свидетельства современников, упоминания в художественной и научной литературе. При изучении объекта были выполнены:

- анализ документации, изучение и анализ дополнительно собранных материалов, изучение архивных материалов и библиографических источников;
- выполнение обмеров здания;
- фотофиксация объекта, выполненная на момент проведения экспертизы, и натурные исследования;
- анализ общих характеристик исторической городской среды и градостроительной ситуации;
- анализ характеристик рассматриваемого объекта;
- метод аналогий, так как исходной информации оказалось недостаточно осуществлен поиск объектов-аналогов, относящихся к тому же автору и/или периоду создания исследуемого объекта, классификация объектов и их характерных признаков, а также их составляющих по типологическим или таксономическим единицам (аспектам, видам, классам) в зависимости от их характеристик [3].

Основная часть. Цель исследования – обоснование принятия решения о целесообразности включения выявленного объекта культурного наследия «Дом жилой на погребках» в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации (далее – ЕГРОКН) и определения категории историко-культурного значения названного объекта в соответствии с Федеральным законом от 25.06.2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» [1] и Законом Белгородской области от 13.11.2003 г. № 97 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) Белгородской области» [2].

Объект исследования – выявленный объект культурного наследия «Дом жилой на погребках», расположенный по адресу: Белгородская область, г. Белгород, проспект Славы, 57.

Факты и сведения, выявленные и установленные в результате проведенных исследований. В результате проведенных научно-исследовательских работ установлено, что исследуемый

памятник включен в перечень выявленных объектов культурного наследия Белгородской области Приказом управления государственной охраны объектов культурного наследия Белгородской области от 09.10.2017 г. № 198 «О включении объекта, обладающего признаками объекта культурного наследия, в перечень выявленных объектов культурного наследия Белгородской области» с наименованием «Дом жилой на погребках», вторая половина XIX века, расположенного по адресу: Белгородская область, г. Белгород, проспект Славы, 57. В результате рассмотрения представленных документов и проведенных исследований составлена историческая справка о застройке г. Белгорода.

Историческая справка.

Белгородская крепость, поставленная в 1650 году, занимала территорию прямоугольной формы, окруженную земляным валом, рвом и рубленными стенами протяженностью около 1400 м. Это был деревянный город со стенами, защищенными восьмью полуредутами, из которых пять находились на северной стороне крепости и три – на южной [8, 9]. Средние полуредуты располагались перед Московской и Везельницкой проездными башнями. Первая из них была шестигранной, вторая квадратной формы и обе имели высокие шатровые завершения. Кроме того, была еще внутренняя проездная Никольская башня посреди восточной стены, к которой непосредственно примыкали кварталы земляного города, лежавшие между крепостью и рекой Северский Донец [10, 11].

Город состоял из трех частей: центральной площади, митрополичьего двора и жилых кварталов. Центральная площадь имела прямоугольные очертания и занимала всю среднюю часть крепости. На продольной оси площади размещалась пятиглавая, соборная церковь и Московская башня. Перед "жиТЕЛЬНЫМ" двором на западной стороне площади возвышалась отдельно стоящая шестигранная колокольня с шатровой крышей. На восточную сторону площади выходили строения митрополичьего двора, а на южную – жилые кварталы [12]. Главное место на площади принадлежало соборной церкви, которая по своим размерам была наиболее значительным сооружением всего центрального ансамбля города. Сюда сходились две улицы, начинающиеся от южной и восточной башен. Северная сторона центральной площади раскрывалась перед Московской башней в свободное пространство, среднюю часть которой занимала квадратная аванплощадь, а восточная и западная части были застроены казармами гарнизона, пороховыми погребами, мастерскими, складами и т.п. [9, 13].

На протяжении нескольких десятилетий, включая первую половину XVIII столетия, центр города не претерпел особых изменений, но жилая территория за крепостными стенами значительно увеличилась. За это время возникли слободы: Жилая, Айгустовская, Старое Городище, Пески, Стрелецкая и другие [12, 14].

XVIII век в архитектуре и градостроительстве России был важным и знаковым. Он характеризуется направлениями – барокко, рококо и классицизмом, проявившимися последовательно в течение века. В этот период появляются новые города, создаются объекты, которые в наше время считаются признанными историческими и архитектурными памятниками. Были созданы государственные архитектурно-строительные комиссии, которые играли роль в градостроительном развитии Санкт-Петербурга и Москвы [15]. Была сформулирована идея архитектуры и градостроительства начиная с петровских времен – идея «регулярности»: строительство по плану, отвод участков в соответствии с общим планом всего города, предварительные утверждения проектов отдельных зданий. В 1762 г. 11 декабря был издан указ об учреждении «Комиссии о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы», организованной по образцу Комиссии 1737 г., под руководством И.И. Бецкого. Ее деятельность заключалась в реконструкции не только столичных, но и провинциальных городов. Согласно указу от 25 июля 1763 года "О сделании всем городам, их строениям и улицам специальных планов, по каждой губернии особо" началась разработка проектов перепланировки российских городов. За 34 года своего существования комиссия, закончившая свою деятельность со смертью Екатерины II, перепланировала 416 городов из 497, существовавших на 1787 год, в обязанности которой вменялись реконструкция старых и возведение новых городов. Реализация работ по реконструкции старых и возведению новых городов (1762–1794 гг.) включала генеральные планы городов и образцовые проекты. Планы отправлялись в губернии, где осуществлялась адаптация проектов к местным условиям, затем в Комиссию о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы, где рассматривались поправки и утверждались проекты, для исполнения которых на места отправлялись архитекторы [15, 16, 17, 18].

В 1766 году в Белгороде вспыхнул большой пожар, сгорело 570 казенных и частных построек. Он опустошил главным образом центр

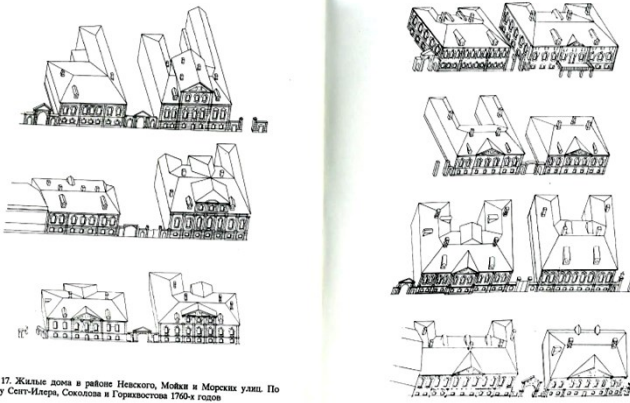
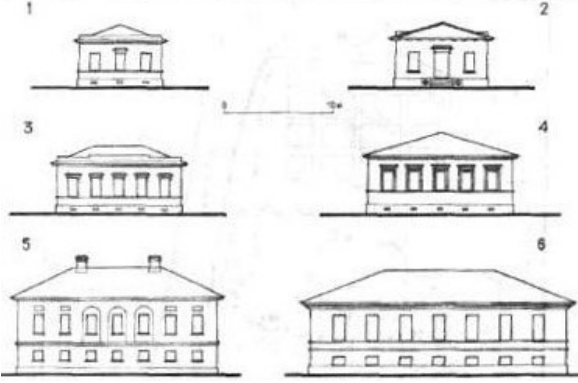
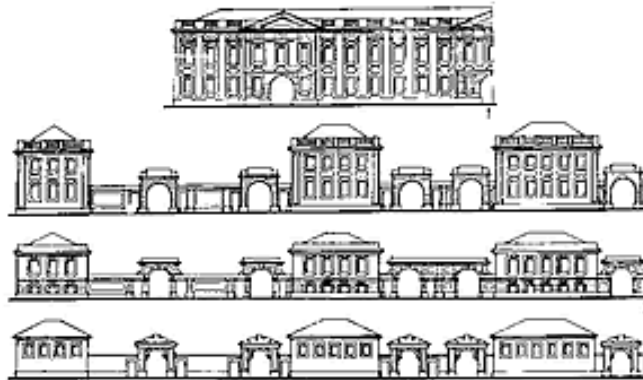
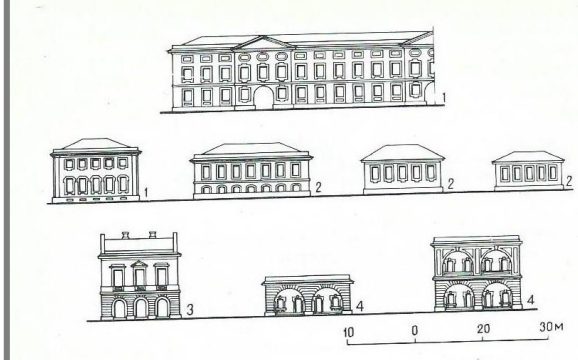
города. Новый план города был утвержден Екатериной II 26 апреля 1768 года и выполнен архитектором А.В. Квасовым. План предусматривал регулярную планировку с выделением центральной торговой площади, которая была сохранена на прежнем месте возле мужского монастыря, окруженного земляными и деревянными укреплениями. Слободы остались не тронутыми.

Алексей Васильевич Квасов совместно с архитекторами М.Ф. Казаковым, И.Е. Старовым и другими в это время принимал участие в разработке "регулярных планов" русских городов. А.В. Квасов стал автором генерального плана Санкт-Петербурга, разработанного к середине 1764 года. После него он работал над планами отдельных частей города. Под его руководством был разработан проект реконструкции набережных Фонтанки, по проекту через реку были перекинуты семь однотипных каменных мостов с башенками. Деятельность архитектора не ограничивалась Петербургом. Он регулировал застройку Москвы, Твери, Тобольска, Тюмени, Харькова, Нижнего Новгорода, Астрахани, Белгорода. Для Твери в 1767 г. А.В. Квасов разработал «образцовые проекты», напечатанные в альбоме «Атлас Тверской губернии». Существование этих не дошедших до нас чертежей косвенно подтверждается также наличием проектов тверских домов 1767 г., подписанных А.В. Квасовым, и квасовскими же проектами типовых домов для Казани, выполненными по образцу тверских. Мало того, именно эти фасады, скорее всего, послужили основой для проектирования «фасадов примерных против протчих вновь строящихся городов» [19, 20].

В ряде случаев тверские типовые проекты использовались в застройке других городов почти без всякого изменения. Свидетельства об этом можно найти в ряде архивных документов. В середине XVIII века в застройке Санкт-Петербурга преобладали дома трех типов: - дома с мезонинами в центральной части, с фронтонами над центральным ризалитом, дома под ровным карнизом. Дома всех трех групп имеют общую стилевую характеристику и отличаются друг от друга деталями решения фасадов. Наиболее распространенным типом каменных жилых домов был одноэтажный жилой дом на погребах в 7–9 осей по фасаду. Во всех группах домов выделялся центр с тремя, реже с пятью окнами. Распространенной формой становится «П» – образный план. В крыльях такого дома было по два или три, реже пять окон (табл. 1) [19, 20, 21].

Таблица 1

Примеры типовых проектов жилых домов по [19]

 17. Жилые дома в районе Невского, Мойки и Морской улиц. По плану Сент-Илера, Соколова и Горьковского 1760-е годы	 «Образцовые» проекты из альбома 1809-1812 гг.: 1–2 – дом деревянный на три окна, 3 – каменный дом на погребном этаже, 4 – мелочная лавка, 5 – дом каменный или деревянный на пять окон на фундаменте, 6 – дом каменный или деревянный на погребном этаже на семь окон.
Жилые дома в районе Невского, Мойки и Морской улиц. 1760 гг.	
 Проекты жилых домов для Твери и Тверской губернии. 1760-е годы. Из альбома «Атлас Тверской губернии и планы городов»: 1–3 – каменные дома, 4 – деревянные дома на каменном фундаменте.	 «Фасады примерные против прочих вновь строящихся городов». 1770-е годы: 1 – каменный дом, 2 – деревянные дома, 3 – дома с лавками на первом этаже, 4 – каменные лавки, одноэтажные и надстроенные.

В 1769 г. вышел указ, разрешивший «устраивать лавки в жилых домах и в них торговать». Кириченко Е.И. считает, что именно к этому времени восходит тип доходного жилого дома – с лавками в первых этажах и квартирами для найма – в верхних. Такие дома строились, по мнению Кириченко Е.И., для купцов, мещан и ремесленников [22, 23]. Также получают распространение жилые дома с несколькими комнатами вместо одного, общего для всей семьи помещения, с пристройкой к сеним специальных помещений для кухонь и служб и устройством двух входов – парадного и черного. Допускалась свобода в использовании проектов, носивших в основном фасадный характер. Это же направление сохранилось и в разработке новой «серии» типовых проектов жилых домов и других частных построек. Пять гравированных альбомов были разработаны архитектором Стасовым и объединены

под общим названием «Собрание фасадов, Его Императорским Величеством высочайше апробированных для частных строений в городах Российской империи» [24]. Все пять альбомов содержали около 200 жилых, хозяйственных, промышленных, торговых и других зданий и свыше 70 проектов заборов и ворот. В альбомах были представлены следующие типы жилых домов: одноэтажные; одноэтажные с выделенным двухэтажным центром; двухэтажные; трехэтажные здания большого объема с развитым архитектурно – пространственным решением [24]. Кроме обычных жилых домов с лавками, они содержали проекты типовых фасадов для общественных зданий [16]. Каждый из этих проектов мог быть использован как отдельно, так и в сочетании с другими «Образцовое» проектирование ограничивалось только фасадами, носившими, как и раньше, ре-

комендательный характер. Вместе с тем существовали руководства, содержащие рекомендации о планировочном и конструктивном решении дома (вплоть до рекомендуемых размеров помещений), а «образцовые» фасады учитывали планировочное решение домов. Тенденция к общему увеличению числа проектов, имевшая место во второй половине XVIII в., продолжала существовать и в первой половине XIX в. При этом принцип зонирования городской застройки был общим для всех городов и сводился к повышению этажности домов от периферии к центру и к возведению в районе центра каменных, а на окраине деревянных домов. Центральный район выделялся старыми монастырскими и кремлевскими ансамблями либо исторически сложившимися, либо новыми церковными, торговыми и административными зданиями. Либо тем и другим.

Рассматривая вопросы типизации частной жилой застройки в русских провинциальных городах во второй половине XVIII в., приходится принимать во внимание, что массовое строительство по типовым проектам далеко не всегда удавалось осуществлять на практике в полной мере. По всей вероятности, это обусловлено отсутствием документов, подробно фиксирующих состояние застройки в провинциальных городах в конце XVIII в. Также усложнена и процедура анализа таких построек, так как они сохранились до настоящего времени в перестроенном и искаженном виде.

Изучая и анализируя застройку Белгорода как сохранившуюся, так и дошедшую до нас только на старинных фотографиях, можно констатировать, что типовое проектирование XVIII-XIX веков имело широкое применение в застройке Белгорода по генеральному плану 1768 г., которое до сих пор мало изучено.

Исследуемый выявленный объект культурного наследия «Дом жилой на погребках» расположен по адресу: г. Белгород, пр. Славы, 57. Это бывшая ул. Садовая, которая ограничивала с северной стороны Свято-Троицкий мужской монастырь. Рассматриваемый район по принципу зонирования городской территории застраивался каменными зданиями. Каменные здания, как правило, строили люди зажиточные, выбирая «образцовые» проекты по своему вкусу. К тому же «погребки» в цокольном этаже могли быть торговой лавкой владельцев дома, второй – парадный этаж, был жилым. Объемно - пространственная, объемно-планировочная композиции и фасадный декор дома характерны для образцовых проектов второй половины XVIII века.

Архивные исследования, проведенные А.И. Лимаровым, помогли установить владельцев

дома с 1889 г., последними из которых были в 1909 г. М.С. Данковская, а с 1913 г. О.А. Бобарыкина.

В результате рассмотрения материалов, в том числе представленных Управлением государственной охраны объектов культурного наследия Белгородской области, установлено следующее.

1. Выявленный объект культурного наследия «Дом жилой на погребках» на основании Приказа управления государственной охраны объектов культурного наследия Белгородской области от 09.10.2017 г № 198 «О включении объектов, обладающих признаками культурного наследия, в перечень выявленных объектов культурного наследия Белгородской области» включен в перечень выявленных объектов культурного наследия Белгородской области с наименованием «Дом жилой на погребках», вторая половина XIX века, по адресу: г. Белгород, пр. Славы, 57.

2. Для экспертируемого - выявленного объекта культурного наследия «Дом жилой на погребках» (г. Белгород, пр. Славы, 57) разработан проект Границ территории. Северная граница территории ОКН проходит по линии застройки проспекта Славы (поворотные точки А-Б). Восточная граница территории проходит по наружной грани стены восточного фасада объекта (поворотные точки В-Г). Западная граница территории объекта культурного наследия проходит по наружной грани стены западного фасада ОКН (поворотные точки Г-А) (рис.1).

3. План здания «П» – образной формы. Дом двухэтажный, кирпичный, главный фасад в девять оконных осей. Первый этаж цокольный со сводчатыми перекрытиями и небольшими квадратными (первоначально) окнами, часть из которых в XX веке была растесана или заложена. Второй этаж парадный, более высокий, с крупными прямоугольными окнами. Цокольный этаж на главном фасаде декорирован кирпичным рустом с крупными замковыми камнями над оконными проемами. На втором этаже прямыми профилированными сандриками выделены три окна в центре (третья, пятая и седьмая оси), обрамленные рамочными наличниками. Под подоконными досками этих окон расположены рельефные рамы с рельефными окружностями по их центрам (табл. 2). Углы дома на главном фасаде оформлены огибающими муфтированными лопатками. Фасады завершены профилированными карнизами. Дворовый фасад изменен поздними пристройками.



Рис. 1. Схема границ территории выявленного ОКН «Дом жилой на погребях», г. Белгород, пр. Славы, 57. Предоставлена Управлением государственной охраны объектов культурного наследия Белгородской области

4. «Дом жилой на погребях» представляет собой градостроительный элемент, формирующий застройку одной из улиц городского центра – пр. Славы, а также является образцом, характерным для периода раннего классицизма и может быть отнесен к одному из «образцовых проектов», разработанных для застройки городов в XVIII веке, представляющих собой историко-культурную ценность.

Выводы. Выявленный объект культурного наследия «Дом жилой на погребях», расположенный по адресу: г. Белгород, проспект Славы, 57, представляет собой оригинальную постройку конца XVIII века, построенного по «образцовому» проекту, разработанному в «Комиссии о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы» под руководством И.И. Бецкого. Он возведен по красным линиям генерального плана 1768 г., разработанного архитектором А.В. Квасовым и является элементом застройки одной из центральных улиц города.

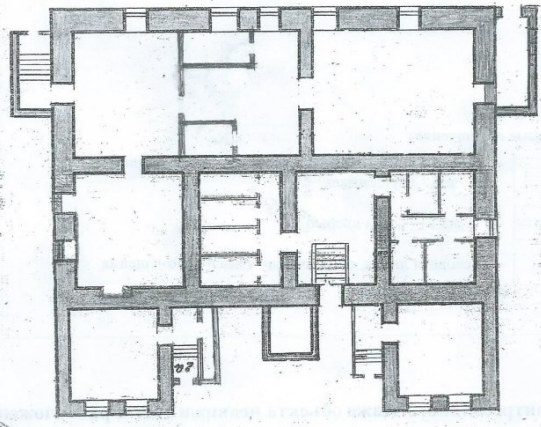
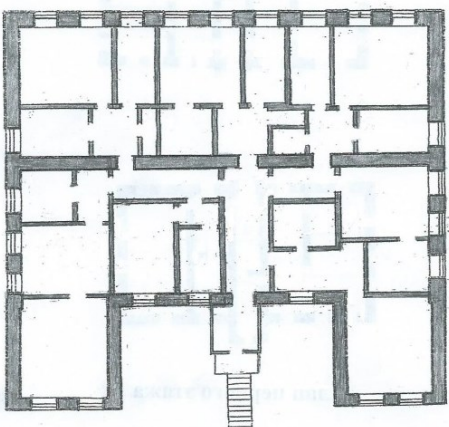
В связи с этим необходимо обеспечить физическую сохранность, выявление и сохранение его историко-культурной ценности, создания условий для современного использования и

включить выявленный объект культурного наследия «Дом жилой на погребях» в единый государственный реестр объектов культурного наследия народов РФ с наименованием – «Дом жилой на погребях» вт. пол. XVIII века. Определить категорию историко-культурного значения объекта - регионального значения. Предметом охраны определить, принимая во внимание тот факт, что здание обладает исторической, мемориальной, градостроительной, архитектурной и функциональной ценностями:

1. Историческую ценность.
2. Мемориальную ценность.
3. Градостроительную значимость в формировании застройки исторического центра.
4. Архитектурную ценность: объемно-пространственную композицию без поздних пристроек к главному и дворовому фасадам; первоначальное объемно-планировочное решение первого и второго этажей; все фасады с сохранением рисунка декоративного оформления и конструктивных решений; функциональную ценность; высотные характеристики здания; материал стен и декора; сводчатые перекрытия цокольного этажа.

Таблица 2

**Натурные обследования и фотофиксация выявленного объекта
культурного наследия «Дом жилой на погребах»**

	
Общий вид по проспекту Славы. Главный фасад. Фото Колесниковой Л.И.	Дворовой фасад. Фото Колесниковой Л.И.
	
План первого (цокольного) этажа. Вычерчены по архивным данным и данным БТИ арх. Колесниковой Л.И.	План второго этажа. Вычерчены по архивным данным и данным БТИ арх. Колесниковой Л.И.
	
Интерьеры цокольного этажа. Фото Колесниковой Л.И.	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закон «Об охране объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002 №73-ФЗ

2. Закон Белгородской области от 13.11.2003 г. № 97 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) Белгородской области».

3. Михайлов А.В. Особенности определения предметов охраны для объектов культурного наследия типа "жилые дома" // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 94–101.

4. Булавский С.В., Семенцов С.В. Подходы к определению категории "объект культурного наследия" в Российском правовом поле / Охрана и реставрация памятников культурного наследия: сб. материалов конф. Всероссийской

научно-теоретической конференции. // Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 12–16.

5. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области) : дис.... д-ра архитектуры. Санкт-Петербург, 2019.

6. Методические указания по проведению градостроительной, историко-культурной и технико-экономической экспертизы недвижимых объектов, состоящих под государственной охраной, в порядке подготовки их к приватизации / ТОО «Ассоциация исследователей Санкт-Петербурга». СПб, 1997.

7. Славина Т.А. Предмет охраны. К вопросу об охране и использовании природно-культурного наследия. // Памятники истории и культуры Санкт-Петербурга: Исследования и материалы. Вып. 4, СПб: Белое и чёрное. 1997. С. 10–23.

8. Зуев В.Ф. Путешественные записки Василья Зуева от С. Петербурга до Херсона в 1781 и 1782 году. М.: Изд. Книга по Требованию, 2013. 298 с.

9. Белгородская энциклопедия: Страницы истории Отечества, Русской Православной церкви, культуры, ратных и трудовых подвигов белгородцев. Гл. ред. В. В. Овчинников. Белгород, 1999. 48 с.

10. Гуляницкий Н.Ф. Градостроительство Московского государства XVI-XVII веков. М., 1994.

11. Шмелев Ю.Н. Когда Москва Белгород строила и Валуйку с Осколом. – Белгород. 1990

12. Кулегаев И. Путеводитель по Белгороду. Белгород, 1911. 43 с.

13. Административно-территориальное деление Белгородского края. Конец XVI – начало XXI вв.: справочник / Сост. Л.В. Горбачева, Е.В. Кривцова, А.А. Кривчиков и др. Белгород, 2011. 536 с.

14. Колесникова Л.И., Семенцов С.В. Белгородские городские усадьбы XVIII в. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 65–68.

15. Клименко Ю.Г., Клименко С.В. Государственные архитектурно-строительные комиссии и их роль в градостроительном развитии Санкт-Петербурга и Москвы в XVIII веке // Academia. Архитектура и строительство. 2012. №4. С. 95–100.

16. Пилявский В.И. История русской архитектуры. Л., 1984.

17. Семенцов С. В. Этапы пространственного формирования Санкт-Петербурга: кристаллизация градостроительного генетического кода, единство развития и сохранения // Промышленное и гражданское строительство. 22/03/2007. С. 29.

18. Семенцов С. В. Развитие регулярной Санкт-Петербургской агломерации после Петра Великого и проблемы ее сохранения как Объекта Всемирного наследия // Вестник гражданских инженеров. № 4 (45). СПб., 2014. С. 16–24.

19. Ожегов С.С. Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках. М.: Стройиздат, 1987. 224 с.

20. «Образцовые» проекты в жилой застройке русских городов XVIII–XIX вв. / Е.А. Белецкая, Н.Л. Крашенинникова, Л.Е. Чернозубова [и др.]. М.: Госстройиздат, 1961. 206 с.

21. Тверской Л.М. Русское градостроительство до конца XVII века: планировка и застройка русских городов. М.: Гос. изд-во лит-ры, по строит-ву и архит., 1953. 215 с.

22. Кириченко Е.И. История развития многоквартирного жилого дома с последней трети XVIII по начало XX в. (Москва, Петербург): Автореф. дис. канд. архит. М., 1964. 24 с.

23. Стадник Е.Б. Исторические предпосылки формирования типологических систем малоэтажного жилища в России // Вестник ТГАСУ. 2013. № 3. С.47-63.

24. Собрание фасадов Его Императорского Величества, высочайше апробированных для частных строений в городах Российской империи. Ч. 1-4. СПб., 1809–1812.

Информация об авторах

Колесникова Людмила Ильинична, профессор кафедры архитектуры и градостроительства

E-mail: arh.lik@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, советник РААСН, профессор, и.о. директора Высшей школы дизайна и архитектуры, профессор Российского университета Дружбы Народов E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Российский университет Дружбы Народов. Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Поступила 18.02.2022 г.

© Колесникова Л.И., Перькова М.В. 2022

¹Kolesnikova L.I., ^{2,3,*}Perkova M.V.¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University³Peoples' Friendship University of Russia

*E-mail: perkova.margo@mail.ru

FEATURES OF THE DEFINITION OF OBJECTS OF PROTECTION FOR THE OBJECT OF CULTURAL HERITAGE OF THE TYPE "RESIDENTIAL HOUSES" – "RESIDENTIAL HOUSE ON CELLARS" IN BELGOROD

Abstract. The paper deals with the problems associated with the definition of the subject of protection of cultural heritage objects for the type of "residential buildings" characteristic of urban (including suburban) urban development centers. The purpose of the study is to substantiate the decision on the advisability of including the identified object of cultural heritage "House in the cellars" in the unified state register of cultural heritage objects (monuments of history and culture) of the peoples of the Russian Federation and determining the category of historical and cultural significance. As a result of the consideration of the submitted documents and the conducted research, a historical note was compiled on the development of the city of Belgorod and the identified object of cultural heritage "Dwelling house on cellars". The "dwelling house on the cellars" is a town-planning element that forms the development of one of the streets of the city center - Slavy Avenue, and is also a model characteristic of the period of early classicism and can be attributed to one of the "exemplary projects" developed for building cities in XVIII century, representing a historical and cultural value. The objects of protection for this type of "residential buildings" are proposed, taking into account their features, location in the urban environment, compositional component, volumetric solution and style characteristics.

Keywords: objects of cultural heritage, objects of protection of the object of cultural heritage, three-dimensional composition, residential buildings, architectural style/

REFERENCES

1. Federal Law of June 25, 2002 N 73-FZ On Cultural Heritage Sites (historical and cultural monuments) of the Peoples of the Russian Federation [Zakon «Ob ohrane ob"ektov kul'turnogo naslediya (pamyatnikah istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii»] (rus)
2. The Law of the Belgorod region of November 13, 2003 N 97 On objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) Belgorod region [Zakon Belgorodskoj oblasti «Ob ob"ektah kul'turnogo naslediya (pamyatnikah istorii i kul'tury) Belgorodskoj oblasti»] (rus)
3. Mihajlov A.V. Peculiarities of determining objects of protection for objects of cultural heritage of the type "residential houses" [Osobennosti opredeleniya predmetov ohrany dlya ob"ektov kul'turnogo naslediya tipa "zhilye doma"]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 12. Pp. 94–101. (rus)
4. Bulavskij S.V., Sementsov S.V. Approaches to the definition of the category "object of cultural heritage" in the Russian legal field [Podhody k opredeleniyu kategorii "ob"ekt kul'turnogo naslediya" v Rossijskom pravovom pole]. Protection and restoration of cultural heritage monuments: collection of materials of the All-Russian Scientific and Theoretical Conference. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. Pp. 12–16. (rus)
5. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noye razvitiye regional'noy sistemy rasseleniya i yeye elementov (na primere Belgorodskoy oblasti)]. Dissertation for the degree of Doctor of Architecture. Saint Petersburg, 2019. (rus)
6. Guidelines for conducting urban planning, historical, cultural and technical-economic examination of immovable objects, which are under state protection, in order to prepare them for privatization [Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu gradostroitel'noi, istoriko-kul'turnoi i tekhniko-ekonomicheskoi ekspertizy nedvizhimykh ob"ektov, sostoyashchikh pod gosudarstvennoi okhranoi, v poryadke podgotovki ikh k privatizatsii]. TOO Assotsiatsiya issledovatelei Sankt-Peterburga. St-Petersburg, 1997. (rus)
7. Slavina T.A. Protection and use of natural and cultural heritage [Predmet okhrany. K voprosu ob okhrane i ispol'zovanii prirodno-kul'turnogo naslediya]. Pamyatniki istorii i kul'tury Sankt-Peterburga: Issledovaniya i material. St.-Petersburg: Be-loe i chernoe, 1997. Pp. 10–23. (rus)
8. Zuev V.F. Travel notes of Vasily Zuev from St. Petersburg to Kherson in 1781 and 1782 [Puteshestvennye zapiski Vasil'ya Zueva ot S. Peterburga do Hersona v 1781 i 1782 godu]. Kniga po Trebovaniyu. Moscow, 2013. 298 p. (rus)
9. Belgorod Encyclopedia: Pages of the history of the Fatherland, the Russian Orthodox Church, cul-

ture, military and labor exploits of Belgorod residents [Belgorodskaya enciklopediya: Stranicy istorii Otechestva, Russkoj Pravoslavnoj cerkvi, kul'tury, ratnyh i trudovyh podvigov belgorodcev]. Ed.: V. V. Ovchinnikov. Belgorod, 1999. 48 p. (rus)

10. Gulyanickij N.F. Urban planning of the Moscow state of the XVI-XVII centuries [Gradostroitel'stvo Moskovskogo gosudarstva XVI-XVII vekov]. Moscow, 1994. (rus)

11. Shmelev Yu.N. When Moscow built Belgorod and Valuika with Oskol [Kogda Moskva Belgorod stroila i Valujku s Oskolom]. Belgorod, 1990. (rus)

12. Kulegaev I. A guide to Belgorod [Putevoditel' po Belgorodu]. Belgorod, 1911. 43 p. (rus)

13. Administrative-territorial division of the Belgorod Region. The end of the XVI - beginning of the XXI centuries: handbook [Administrativno-territorial'noe delenie Belgorodskogo kraja. Konec XVI – nachalo XXI vv.: spravochnik]. Comp. L.V. Gorbachev, E.V. Krivtsova, A.A. Krivchikov, etc. Belgorod, 2011. 536 p. (rus)

14. Kolesnikova L.I., Sementsov S.V. Belgorod city estates of the XVIII century [Belgorodskie gorodskie usad'by XVIII v.]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 3. Pp. 65–68. (rus)

15. Klimenko Yu.G., Klimenko S.V. State architectural and construction commissions and their role in the urban development of St. Petersburg and Moscow in the XVIII century [Gosudarstvennye arhitekturno-stroitel'nye komissii i ih rol' v gradostroitel'nom razvitii Sankt-Peterburga i Moskvy v XVIII veke]. Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2012. No. 4. Pp. 95–100. (rus)

16. Pilyavsky V.I. History of Russian architecture [Istoriya russkoj arhitektury]. Leningrad. 1984. (rus)

17. Sementsov S. V. Stages of spatial formation of St. Petersburg: crystallization of urban genetic code, unity of development and preservation [Etapy prostranstvennogo formirovaniya Sankt-Peterburga: kristallizaciya gradostroitel'nogo geneticheskogo koda, edinstvo razvitiya i sohraneniya]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 22/03/2007. p. 29. (rus)

18. Sementsov S.V. The development of the regular St. Petersburg agglomeration after Peter the Great and the problems of its preservation as a World Heritage Site [Razvitie regul'yarnoj Sankt-Peterburgskoj aglomeracii posle Petra Velikogo i problemy ee sohraneniya kak Ob"ekta Vsemirnogo naslediya]. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2014. No. 4 (45). Pp. 16–24. (rus)

19. Ozhegov S.S. Typical and repeated construction in Russia in the XVIII-XIX centuries [Tipovoe i povtornoe stroitel'stvo v Rossii v XVIII–XIX vekah] Moscow: Stroyizdat, 1987. 224 p. (rus)

20. "Exemplary" projects in residential development of Russian cities of the XVIII–XIX centuries [«Obrazcovye» proekty v zhiloj zastrojke russkih gorodov XVIII – XIX vv.] / E.A. Beletskaya, N.L. Krashenninnikova, L.E. Chernozubova [etc.]. Moscow: Gosstroizdat, 1961. 206 p. (rus)

21. Tverskoy L.M. Russian urban planning until the end of the XVII century: planning and building of Russian cities [Russkoe gradostroitel'stvo do konca XVII veka: planirovka i zastrojka russkih gorodov] Moscow: State-Publishing House of Literature, on Construction and Architecture, 1953. 215 p. (rus)

22. Kirichenko E.I. The history of the development of an apartment building from the last third of the XVIII to the beginning of the XX century [Istoriya razvitiya mnogokvartirnogo zhilogo doma s poslednej treti XVIII po nachalo XX v.] (Moscow, St. Petersburg): Abstract. dis. cand. archit. Moscow, 1964. 24 p.

23. Stadnik E.B. Historical prerequisites for the formation of typological systems of low-rise housing in Russia [Istoricheskie predposylki formirovaniya tipologicheskikh sistem maloetazhnogo zhilishcha v Rossii]. Vestnik TGASU. 2013. No. 3. Pp. 47–63.

24. Collection of facades of His Imperial Majesty, highly tested for private buildings in the cities of the Russian Empire [Sobranie fasadov Ego Imperatorskogo Velichestva, vysochajshe aprobovannyh dlya chastnyh stroenij v gorodah Rossijskoj imperii]. Parts 1-4. St. Petersburg, 1809–1812.

Information about the authors

Kolesnikova, Lyudmila I. Assistant Professor. E-mail: arh.lik@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia. Peoples' Friendship University of Russia. Miklukho-Maclay st., 6. Russia, Moscow, 117198

Received 18.02.2022

Для цитирования:

Колесникова Л.И., Перькова М.В. Особенности определения предметов охраны для объекта культурного наследия типа «жилые дома» – «дом жилой на погребах» в г. Белгороде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-71-81

For citation:

Kolesnikova L.I., Perkova M.V. Features of the definition of objects of protection for the object of cultural heritage of the type "residential houses" – "residential house on cellars" in Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-71-81

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-82-91

Рахимбаев Ш.М., *Оноприенко Н.Н., Рахимбаев И.Ш.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

*E-mail: dstt_80@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ АЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ

Аннотация. Процессы гидратации и гидратного фазообразования алюмоферритов кальция недостаточно освещены в технической литературе. Термодинамический анализ процессов гидратации алюмоферрита кальция $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ затруднен из-за ненадежности исходных данных для продуктов гидратации. Требуется уточнения вопрос основности гидроферритов кальция. Недостаточно информации по обоснованию методики расчетов термодинамических свойств гидроферрита - ΔG^0_{298} , $-\Delta H^0_{298}$ и $s(T)$, верификации их результатов, механизму образования комплексного аниона $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ и его устойчивости в жидкой фазе гидратирующегося C_4AF .

Рассмотрена гидратация $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ с образованием в качестве гидратных фаз $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, сопоставлена энергия водородных связей между слоями $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$, из которых сложены гексагональные слои указанных сложных гидроксидов кальция, алюминия и железа. Показано, что приведенные в справочниках величины ΔG^0_{298} и ΔH^0_{298} $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, равные соответственно -937,2 и -1082,3 ккал/моль, не согласуются с экспериментальными данными по растворимости C_2FH_8 и удельным тепловыделением при гидратации C_4AF (100–115 ккал/г). Рекомендуемые величины для C_2FH_8 , $\Delta G^0_{298} = -933$, $\Delta H^0_{298} = -1072$ ккал/моль. Показано, что в качестве промежуточного продукта гидратации C_4AF предпочтительно образование не иона $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, а гидроксида $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в аморфном состоянии.

Ключевые слова: термодинамика, гидроферрит, гидроалюминат кальция, активность ионов, свободная энергия, энтальпия.

Введение. Образующийся в результате обжига сырьевой смеси портландцементный клинкер имеет достаточно сложный минералогический состав. Основную роль в нем играют четыре минерала: трехкальциевый силикат 3CaOSiO_2 , двухкальциевый силикат 2CaOSiO_2 , трехкальциевый алюминат $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ и четырехкальциевый алюмоферрит $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

При смешении цемента с водой на начальных стадиях твердения в реакцию гидратации интенсивно вступают алюминаты и алюмоферриты кальция, благодаря более высокой константе скорости растворения по сравнению с алитом и белитом. Раствор становится пересыщенным по отношению к конечному продукту и из него на поверхности зерен клинкера и в объеме раствора образуются гидроалюминаты и гидроферриты кальция различного состава.

Алюмоферритная фаза представляет собой твердый раствор алюмоферритов кальция различного состава, который в свою очередь зависит от состава сырьевых смесей, условий обжига и т. п. В клинкере алюмоферритная фаза по своему составу близка к четырехкальциевому алюмоферриту. Четырехкальциевый алюмоферрит $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) - железосодержащий минерал, обладающий достаточно высокой скоростью гидратации и обеспечивающий рост прочности системы в первые часы твердения [1–4].

Алюмоферриты кальция являются вторым по значимости минералом портландцемента, определяющим его вяжущие свойства [1–14]. Несмотря на это, процессы их гидратации и гидратного фазообразования недостаточно освещены в технической литературе [15–19]. В частности, не вполне ясна основность гидроферритов кальция. Ранее считалось, что она равна 1 [1–4]. Позднее отмечалось, что она выше и равна 3–4, а их состав сходен с гидроалюминатами кальция – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$ [5–8, 9–13].

В последние годы ряд специалистов допускает существование гидроферрита кальция $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [5]. Приводятся также термодинамические свойства этого гидроферрита – ΔG^0_{298} – ΔH^0_{298} и $s(T)$, однако без серьезного обоснования методики расчетов и верификации их результатов, не рассмотрен механизм образования комплексного аниона $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ и его устойчивости в жидкой фазе гидратирующегося C_4AF [5].

Данная работа посвящена этим недостаточно исследованным вопросам.

Требуется уточнения вопрос об основности гидроферрита кальция, тогда как основность гидроалюминатов установлена вполне точно. В связи с этим необходимо сравнить кислотно-основные свойства гидроксидов алюминия и же-

леза. Гидроксид кальция входит в состав гексагональных гидроалюминатов и гидроферритов, является довольно сильным основанием. Кислотные свойства гидроксида алюминия и железа чрезвычайно слабы. В связи с этим основность гидроалюминатов и гидроферритов кальция тем выше, чем больше кислотные свойства соответствующего гидроксида. К сожалению, данные о сравнительных кислотных свойствах этих гидроксидов противоречивы, что не позволяет прогнозировать сравнительную основность соответствующих соединений их с гидроксидом кальция. Нужно уточнение кислотно-основных свойств алюминия и кальция с учетом имеющихся данных по этому вопросу.

Показатели кислотных свойств H_3AlO_3 и H_3FeO_3 необходимы также для верификации расчетных данных по растворимости гидроферритов кальция. Чем выше кислотные свойства H_3RO_3 , тем ниже растворимость соответствующих соединений их с $Ca(OH)_2$.

Методика. Термодинамические расчеты проводились с использованием стандартных справочных данных, приведенных в технической литературе, уточненных в ряде случаев, авторами.

Основная часть. Полная аналогия составов и свойств гидроалюминатов и гидроферритов кальция мало вероятна, так как алюминий и железо существенно отличаются по своим кислотно-основным свойствам. Приближенная оценка последних производится по величине электроотрицательности элементов [20, 21]. Существует несколько шкал электроотрицательности, которые зачастую сильно отличаются друг от друга.

По мнению Л. Полинга, С.С. Баданова и других авторов [20, 21] электроотрицательность Al равна 1,5, а Fe – 1,6–1,8.

Из этих данных следует, что Fe существенно превосходит Al по величине электроотрицательности. Однако, по мнению В.В. Некрасова, электроотрицательность Al выше, чем Fe [22].

Одним из показателей химического сродства веществ является их склонность к образованию соединений друг с другом. Известны ферриты $CaO \cdot Fe$ и $2CaO \cdot Fe_2O_3$. Количество алюминатов кальция значительно больше – это CA_2 , CA , $C_{12}A_7$, C_5A_3 , C_3A . Это подтверждает мнение В.В. Некрасова и свидетельствует о более высоком сродстве Al_2O_3 к CaO .

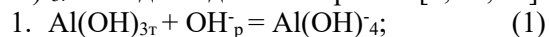
Понятие электроотрицательности относится к химическим элементам, носит слишком общий характер и не учитывает особенностей проявления физико-химических свойств их соединений в конкретных условиях. В связи с изложенным рас-

смотрим процессы образования различных соединений Al и Fe, содержащих гидроксильную группу, с точки зрения кристаллохимии, теории химической связи и химической термодинамики.

С точки зрения кристаллохимии, гексагональные гидроалюминаты и гидроферриты кальция $mCaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$ и $mCaO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ представляют собой смешанные гидроксиды, в которых плоские слои $Ca(OH)_2$ соединены со слоями $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$ водородными связями [21]. Их образование обусловлено тем, что эффективные заряды ионов водорода у гидроксидов Al и Fe выше, чем у $Ca(OH)_2$. Это вызывает образование между слоями $Ca(OH)_2$ с одной стороны, $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$ с другой диполь-дипольных связей со смещением электронов к последним.

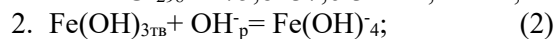
Для решения вопроса о том, где смещение электронов больше – в гидроалюминатах или гидроферритах кальция – используем метод химической термодинамики.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим процесс присоединения гидроксильной группы OH^- , находящейся в жидкой фазе, к гидроксидам трехвалентных элементов в твердом состоянии $Al(OH)_{3т}$ и $Fe(OH)_{3т}$, а затем и в растворе $Al(OH)_{3р}^0$ и $Fe(OH)_{3р}^0$. Исходные данные берем из [5, 23, 24].



$$1.1. \Delta G^0_{298} = 273 + 37,6 - 312 = -1,4 \text{ ккал};$$

$$1.2. \Delta G^0_{298} = 275,8 + 37,6 - 312 = 1,4 \text{ ккал};$$



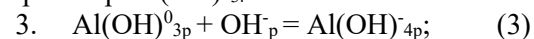
$$2.1. \Delta G^0 = 166 + 37,6 - 201,7 = 1,9 \text{ ккал};$$

$$2.2. \Delta G^0 = 170,2 + 37,6 - 201,7 = 6,1 \text{ ккал}.$$

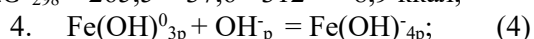
В приведенных уравнениях гидроксидизации 1.1 и 2.1 исходный гидроксид находится в аморфном состоянии, а 1.2 и 2.2 – в кристаллическом.

Расчеты свидетельствуют о том, что гидроксид железа в твердом состоянии обладает значительно меньшим сродством к группе OH^- , чем $Al(OH)_3$. Присоединение гидроксила к аморфным разновидностям гидроксидов термодинамически более вероятно, чем к кристаллическим.

Теперь рассмотрим реакции гидроксидизации гидроксидов алюминия и железа, находящихся в растворе $R(OH)^0_3$.



$$\Delta G^0_{298} = 265,5 + 37,6 - 312 = -8,9 \text{ ккал};$$



$$\Delta G^0_{298} = 160,3 + 37,6 - 201,7 = -3,8 \text{ ккал}.$$

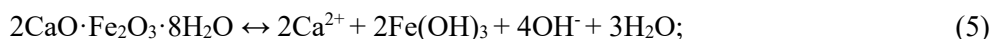
Из приведенных расчетов следует, что образование иона $Fe(OH)^-_{4г}$ возможно лишь путем гидроксидизации молекулы $Fe(OH)^0_3$, находящейся в растворе. Присоединенные группы OH^- к гидроксиду алюминия также происходит преимущественно в жидкой фазе из молекул $Al(OH)^0_3$.

Сравнение свободных энергий процессов гидроксидизации $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$ в растворе и

в твердой фазе приводит к выводу, что первое из этих соединений проявляет более выраженные кислотные свойства, чем последнее. Отсюда следует, что мнение Л. Полинга, С.С. Бацанова и других о более высокой электроотрицательности

Fe в сравнении с Al требует дополнительного исследования.

Теперь рассчитаем ΔG^0_{298} растворения гидроферрита кальция C_2FH_8 , используя исходные данные [5].

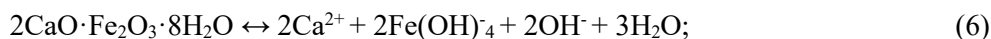


$$\Delta G^0_p = 937,2 - 2 \cdot 132,2 - 2 \cdot 166 - 4 \cdot 37,6 - 3 \cdot 56,7 = 20,3 \text{ ккал/моль};$$

$$2[Ca^{2+}] = 0,12 \text{ г/л CaO}, [Ca^{2+}] = 0,06 \text{ г/л CaO}.$$

Этот результат является заниженным. Возможно, что этот результат объясняется тем, что

C_2FH_8 растворяется с образованием не гидроксида железа, а комплексного иона $Fe(OH)_4^-$. Рассмотрим этот вариант.



$$\Delta G_p = 937,2 - 2 \cdot 132,2 - 2 \cdot 201,7 - 2 \cdot 37,6 - 3 \cdot 56,7 = 24,1 \text{ ккал};$$

$$\lg K_p = -17,66; K_p = [Ca^{2+}]^6;$$

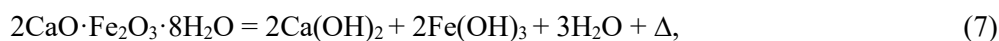
$$\lg[Ca^{2+}] = -2,94; [Ca^{2+}] = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,064 \text{ г/л CaO}, 2[Ca^{2+}] = 0,13 \text{ г/л}.$$

Этот результат мало отличается от предыдущего. Наиболее вероятной причиной этого является завышенное значение изобарно-изотермического потенциала гидроферрита кальция, приведенное в [5].

Изобарно-изотермический потенциал хорошо изученного кристаллохимического аналога C_2FH_8 – гидроалюмината кальция C_2AH_8 равен –1151,5–1153 ккал/моль [5, 25], тогда как сумма ΔG^0_{298} входящих в него компонентов –1144,9 ккал/моль. Разница равна –6,6 ккал/моль.

Она объясняется тем, что формирование структуры смешанных гидроксидов гексагональной сингонии обусловлено образованием донорно-акцепторных связей между слоями, что сопровождается снижением свободной энергии системы.

Произведем расчет ΔG^0_{298} суммы исходных компонентов, входящих в состав C_2FH_8 , исходя из изложенных выше данных о том, что они мало отличаются от ΔG^0_{298} гидроферрита.



$$\Delta G^0_{298} = -2 \cdot 214,4 - 2 \cdot 170,8 - 3 \cdot 56,7 = -940,5 + \Delta,$$

где Δ – термодинамический эффект образования C_2FH_8 из исходных гидроксидов. Этот расчет свидетельствует о том, что величина ΔG^0_{298} для C_2FH_8 более –940 ккал/моль, а не равна 937,2 ккал/моль.

Это обусловлено тем, что авторы [5] при расчете ΔG^0_{298} для C_2FH_8 использовали численное значение ΔG^0_{298} для $2Fe(OH)_3$, равное 170,2 ккал/моль. Если принять, что эта величина равна -166 ккал/моль [24], то получим сумму -930 ккал/моль. Синтез C_2FH_8 из гидроксидов ведет к снижению ΔG^0_{298} еще на 2-3 ккал/моль из-за образования между $Ca(OH)_2$ и $Fe(OH)_3$ водородных связей.

$$\Delta G^0_p = 942,0 - 2 \cdot 132,2 - 2 \cdot 170,2 - 4 \cdot 37,6 - 3 \cdot 56,7 = 16,7 \text{ ккал/моль},$$

$$[Ca^{2+}] = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,33 \text{ г/л CaO}; [OH^-] = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ г-ион/л}, 2[Ca^{2+}] = 0,66 \text{ г/л}.$$

Рассчитаем растворимость C_2FH_8 , для чего определим ионную силу раствора f и далее γ -коэффициенты активности ионов Ca^{2+} и OH^- [15].

Рассмотрим растворение C_2FH_8 с образованием в качестве первичного продукта $Fe(OH)_3$ в аморфном состоянии. Для него $-\Delta G^0_{298} = -166,0$, -

Исходя из изложенного, принимаем для C_2FH_8 значение $\Delta G^0_{298} = -933$ ккал/моль при ΔG^0_{298} у $Fe(OH)_3 = -166$ ккал/моль или -942,0 ккал/моль, если ΔG^0_{298} гидроксида железа принять -170,8 ккал/моль [4, 5, 8].

Первый вариант относится к процессу образования при гидратации C_4AF аморфного $Fe(OH)_3$, а второй – кристаллического.

Кристаллизация гидроксида железа – длительный процесс, а C_4AF гидратируется быстро, поэтому C_2FH_8 образуется из аморфного $Fe(OH)_3$.

Теперь пересчитаем реакцию (5).

$\Delta H^0_{218} = 197$ ккал/моль. При этом ΔG^0_{298} для $C_2FH_8 = 933$, а $-\Delta H^0_{298} = 1072$ ккал/моль.

Расчет по уравнению (5) дает $\Delta G^0_{298} = 933 - 2 \cdot 132,2 - 2 \cdot 166 - 4 \cdot 37,6 - 3 \cdot 56,7 = 16,1$ ккал/моль.

$$\lg K_p = -11,8; \lg[Ca^{2+}] = -2,47;$$

$$2[\text{Ca}^{2+}] = 6,78 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/л} = 0,38 \text{ г/л CaO};$$

$$f = 0,5(6,78 \cdot 4 + 6,76 \cdot 2) \cdot 10^{-3} = 2,03 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,57;$$

$$c_{\text{Ca}^{2+}} = 0,67 \text{ г/л CaO}; \text{ pH} = 12,1.$$

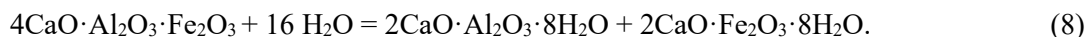
Расчет по уравнению (6):

$$\Delta G_p^0 = 933 - 132,2 \cdot 2 - 2 \cdot 166 - 4 \cdot 37,6 - 3 \cdot 56,7 = 29,3;$$

$$\lg K_p = -21,48; \lg[\text{Ca}^{2+}] = -3,58;$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ г-ион/л} = 0,015 \text{ г/л CaO},$$

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



Сначала используем исходные данные [5].

$$\Delta H_{298}^0 = 1215,3 + 16 \cdot 68,3 - 1299,8 - 1082,8 = -73,5 \text{ ккал/моль}.$$

Молекулярная масса C_4AF равна $M = 486$ Дальтон. Отсюда получим удельное тепловыделение h :

$$\Delta h = \Delta H/M = 73,5 \cdot 1000/486 = 151,2 \text{ кал/г}.$$

$$\Delta h = (1215,3 + 16 \cdot 68,3 - 1291 - 1072)/486 = -54,9/486 = -113 \text{ кал/г}.$$

Этот результат достаточно близок к тепловыделению C_4AF , равному 100–105 кал/г при степени гидратации около 90 % [5].

Экспериментально установлено, что при испытании на сульфатостойкость алюмоферритных цементов с использованием пористых малых образцов по методике В.В. Кинда, вопреки ожиданиям, получается отрицательный результат, так как происходит интенсивное выщелачивание $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Достаточно плотные образцы стандартного состава размером $4 \times 4 \times 16$ см в этих же условиях вполне сульфатостойки [26]. Эти данные согласуются с результатами приведенных выше расчетов, которые свидетельствуют о повышении растворимости гидроферритов кальция в воде.

Выводы. Гидроалюминаты и гидроферриты кальция гексагональной сингонии $m\text{CaO} \cdot \text{R}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ представляют собой смешанные гидроксиды, в которых связь между двумерными (плоскими) слоями осуществляется благодаря диполь-дипольным связям, обусловленным разной величиной эффективного заряда водорода в $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

- Сродство гидроксида $\text{Al}(\text{OH})_3$ к гидроксиду в растворе выше, чем у $\text{Fe}(\text{OH})_3$, что обуславливает более прочные связи между слоями в гидроалюминатах, чем гидроферритах, а растворимость в воде последнего выше и равна 0,6 г/л CaO , тогда как у C_2AH_8 0,3–0,4 г/л CaO .

- Приведенное в справочной литературе численное значение ΔG_{298}^0 для C_2FH_8 , равное -937,2

$$\text{pH} = 10,4.$$

Этот результат хуже, чем предыдущий, поэтому реакция гидратации C_4AF с образованием иона $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ мало вероятны. Это согласуется с экспериментальными данными [8] о том, что в продуктах гидратации C_4AF присутствует много гидроксида железа.

Для дополнительной верификации численных значений ΔG и ΔH двухосновных гидроалюмината и гидроферрита кальция рассчитаем их тепловыделение при полной гидратации C_4AF по реакции:

Эта величина в полтора раза выше экспериментальных данных [5].

Теперь рассчитаем Δh , используя численные значения ΔH_{298}^0 , рекомендуемые авторами данной работы.

ккал/моль не соответствует растворимости этого минерала в воде.

Предлагается для C_2FH_8 величины $\Delta G_{298}^0 = -933$; $\Delta H_{298}^0 = -1072$ ккал/моль.

- Растворение C_2FH_8 с образованием иона $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ мало вероятно в сравнении с реакцией, сопровождающейся с выпадением большей части ионов железа в осадок в виде аморфного гидроксида.

Образование в жидкой фазе гидратирующихся в воде частиц C_4AF комплексных анионов $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ и $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ происходит не путем присоединения групп OH^- к твердым частицам $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$, а преимущественно посредством перехода их молекул в раствор с последующей их гидроксидизацией.

- Установленные авторами данные о повышенной растворимости гидроферрита кальция C_2FH_8 в сравнении с гидроалюминатом той же основности согласуется с экспериментальными данными о низкой сульфатостойкости алюмоферритных цементов в условиях интенсивного выноса $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из образцов, тогда как при его отсутствии эти цементы отличаются высокой сопротивляемостью сульфатной агрессии.

- Из изложенных соображений следует предположение, что устойчивость таких гидроферритов, как C_3FH_6 и C_4FH_{13} мало вероятна, тогда как стабильность низкоосновных гидроферритов Ca возможна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко И.В. Глиноземистый цемент. М: Госстройиздат, 1961. 175 с.
2. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. М.: Стройиздат, 1956. 209 с.
3. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашов В.В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
4. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона. М.: Стройиздат, 1961. 646 с.
5. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М.: Стройиздат, 1986. 410 с.
6. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 562 с.
7. Коупленд Л.Е., Кантро Д.Л. Гидратация портландцемента // Труды V Международного конгресса по химии цемента. М.: Стройиздат, 1973. С. 175–184.
8. Кайзер В.Л., Тенусасе Н. Гидратация ферритной фазы портландцемента // Труды V Международного конгресса по химии цемента. М.: Стройиздат, 1973. С. 221–222.
9. Sarkisov P.D., Sivkov S.P., Kuznetsova T.V., Meshalkin V.P. Using the methods of thermodynamic analysis to optimize the composition of high-refractory cements in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ system // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Т. 47. № 1. Рр. 10–13.
10. Samchenko S.V., Krivoborodov Y.R., Burlov I.Y. Usage aluminiferous waste in the production of aluminate cements // 17th International multidisciplinary scientific geoconference sgem 2017. 2017. Рр. 465–472.
11. Сивков С.П. Термодинамический анализ фазообразования при твердении карбонатсодержащих цементов // Цемент и его применение. 2008. №4. С. 112–115.
12. Авлезова А.Э., Кривобородов Ю.Р. Свойства тампонажных растворов на основе сульфоалюминатного клинкера // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. №4 (214). С. 32–33.
13. Молчан Н.В., Кривобородов Ю.Р., Фертников В.И. Межатомные взаимодействия в бинарных соединениях алюминия // Техника и технология силикатов. 2019. Т. 26. №3. С. 82–86.
14. Lothenbach, B., Matschei, T., Moschner, G., Glasser, F. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement // Cement and Concrete Research. 2008. № 38(1). Рр. 1–18.
15. Румянцев Н.Ф., Хотимченко В.С., Никущенко В.М. Гидратация алюминатов кальция. Ленинград: Наука, 1974. 80 с.
16. 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.
17. 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.
18. 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. 119777.
19. 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. Рр. 218–225.
20. Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. Ленинград: Химия, 1983. 232 с.
21. Бацанов С.С. Структурная рефрактометрия. М.: МГУ, 1958. 224 с.
22. Некрасов В.В. Курс общей химии. М.: Госхимиздат, 1955. 972 с.
23. Карпов И.К., Кашик С.А., Пампура В.Д. Константы веществ для термодинамических расчетов в геохимии и петрологии. М.: Наука, 1968. 172 с.
24. Наумов Г.В., Рыженко В.И., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин. М.: Атомиздат, 1971. 238с.
25. Рахимбаев Ш.М., Рахимбаев И.Ш., Попеску Н.М. Верификация термодинамических свойств гидроалюминатов кальция и их фазовые превращения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №11. С.133–137.
26. Канцельпольский И.С. Глиез как активная минеральная добавка. Ташкент: Наука, 1961. 290 с.

Информация об авторах

Рахимбаев Шарк Матрасулович, доктор технических наук, профессор. E-mail: i_rahim@mail.ru.

Оноприенко 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.

Рахимбаев Игорь Шаркович, кандидат технических наук.

Поступила 22.11.2021 г.

© Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Рахимбаев И.Ш., 2022

Rahimbaev Sh.M., *Onoprienko N.N., Rahimbaev I.Sh.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: dstt_80@mail.ru

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF HYDRATION PROCESSES OF CALCIUM ALUMINO-FERRITES

Abstract. The processes of hydration and hydrate phase formation of calcium aluminoferrites are insufficiently covered in the technical literature. Thermodynamic analysis of the hydration processes of calcium aluminoferrite of $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ is difficult due to the unreliability of the initial data for hydration products. The question of the basicity of calcium hydroferrites requires clarification. There is insufficient data on the justification of the method of calculating the thermodynamic properties of hydroferrite $-\Delta G_{298}^0$, $-\Delta H_{298}^0$ and $c(T)$, verification of their results, the mechanism of formation of the complex anion $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ and its stability in the liquid phase of hydrating C_4AF .

The hydration of $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ with the formation of $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ as hydrate phases is considered. The energy of hydrogen bonds between the layers of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ and $\text{Fe}(\text{OH})_3$, from which the hexagonal layers of these complex calcium, aluminum and iron hydroxides are composed, is compared. It is shown that the values of ΔG_{298}^0 and ΔH_{298}^0 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, which are equal to -937.2 and -1082.3 kcal/mol, respectively, are not consistent with experimental data on the solubility of C_2FH_8 and the specific heat release during C_4AF hydration (100–115 kcal/g). Values for C_2FH_8 , $\Delta G_{298}^0 = -933$, $\Delta H_{298}^0 = -1072$ kcal/mol are recommended. It is shown that the formation of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hydroxide in the amorphous state, rather than the $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ion, is preferable as an intermediate product of C_4AF hydration.

Keywords: thermodynamics, hydroferrite, calcium hydroaluminates, ion activity, free energy, enthalpy.

REFERENCES

1. Kravchenko I.V. Alumina cement [Glinozemistyj cement]. M.: Gosstroizdat, 1961. 175 p. (rus)
2. Kuznecova T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements [Aljuminatnye i sul'foaljuminatnye cement]. M.: Strojizdat, 1956. 209 p. (rus)
3. Kuznecova T.V., Kudrjashov I.V., Timashov V.V. Physical chemistry of binders [Fizicheskaja himija vjazzhushhih materialov]. M.: High school, 1989. 384 P. (rus)
4. Li F.M. Cement and concrete chemistry [Himija cementa i betona]. Perevod s anglijskogo. M.: Strojizdat, 1961. 646 P. (rus)
5. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosjan O.P. Thermodynamics of silicates [Termodinamika silikatov]. M.: Strojizdat, 1986. 410 P. (rus)
6. Tejlör H. Cement chemistry. English Translation [Himija cementa. Perevod s anglijskogo]. M.: The World. 1996. 562 p. (rus)
7. Kouplend L.E., Kantro D.L. Hydration of portland cement [Gidratacija portlandcementsa]. Proceedings of the V International Congress on cement chemistry. M.: Stroyizdat, 1973. Pp. 175–184. (rus)
8. Kajzer V.L., Tenusase N. Hydration of the ferrite phase of Portland cement [Gidratacija ferritnoj fazy portlandcementsa]. Proceedings of the V International Congress on cement chemistry. M.: Stroyizdat, 1973. Pp. 221–222. (rus)
9. Sarkisov P.D., Sivkov S.P., Kuznetsova T.V., Meshalkin V.P. Using the methods of thermodynamic analysis to optimize the composition of high-refractory cements in the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ system. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Vol. 47. No.1. Pp. 10–13.
10. Samchenko S.V., Krivoborodov Y.R., Burlov I.Y. Usage aluminiferous waste in the production of aluminate cements. 17th International multidisciplinary scientific geoconference sgem 2017. 2017. Pp. 465–472.
11. Sivkov S.P. Thermodynamic analysis of phase formation during hardening of carbonate-containing cements [Termodinamicheskij analiz fazoobrazovaniya pri tverdenii karbonatsoderzhashchih cementov]. Cement and its application. 2008. No. 4. Pp. 112–115. (rus)
12. Avlezova A.E., Krivoborodov Yu.R. Properties of cement slurries based on sulfoaluminate clinker [Svoystva tamponazhnyh rastvorov na osnove sul'foaljuminatnogo klinkera]. Advances in chemistry and chemical technology. 2019. Vol. 33. No.4 (214). Pp. 32–33. (rus)

13. Molchan N.V., Krivoborodov Yu.R., Fertikov V.I. Interatomic interactions in binary aluminum compounds [Mezhatomnye vzaimodejstviya v binarnykh soedineniyah alyuminiya]. Technique and technology of silicates. 2019. Vol. 26. No. 3. Pp. 82–86. (rus)
14. Lothenbach B., Matschei T., Moschner G., Glasser F. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. Cement and Concrete Research. 2008. No 38(1). Pp. 1–18.
15. Rumjancev N.F., Hotimchenko V.S., Nikushhenko V.M. Hydration of calcium aluminates [Gidratacija aluminatov kal'cija]. Leningrad: Nauka, 1974. 80 p. (rus)
16. Rakhimbaev Sh. M., Onoprienko N. N., Salnickowa O. N. Thermodynamic analysis of tricalcium silicate hydration [Termodinamicheskij analiz gidratacii trekhkal'cievogo silikata]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 75–81. (rus)
17. 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)
18. 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. 119777.
19. 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.
20. Ravdel' A.A., Ponomareva A.M. Quick reference of physical and chemical quantities [Kratkij spravochnik fiziko-himicheskikh velichin]. Leningrad: Khimiya, 1983. 232 p. (rus)
21. Bacanov S.S. Structural refractometry [Strukturnaja refraktometrija]. M.: MOSCOW STATE UNIVERSITY, 1958. 224 P. (rus)
22. Nekrasov V.V. General chemistry course [Kurs obshhej himii]. M: Goskhimizdat, 1955. 972 p. (rus)
23. Karpov I.K., Kashik S.A., Pampura V.D. Constants of substances for thermodynamic calculations in Geochemistry and Petrology [Konstanty veshhestv dlja termodinamicheskikh raschetov v geohimii i petrologii]. M: Nauka, 1968. 172 p. (rus)
24. Naumov G.V., Ryzhenko V.I., Hodakovskij I.L. Handbook of thermodynamic quantities [Spravochnik termodinamicheskikh velichin]. M.: Atomizdat, 1971. 238 p. (rus)
25. Rahimbaev Sh.M., Rahimbaev I.Sh., Popescu N.M. Verification of the thermodynamic properties of hydroalumination calcium and their phase transformations [Verifikacija termodinamicheskikh svoystv gidroaluminatov kal'cija i ih fazovye prevrashhenija]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 133–137. (rus)
26. Kancepol'skij I.S. Clay as an active mineral additive [Gliezhi kak aktivnaja mineral'naja dobavka]. Tashkent: Nauka, 1961. 290 p. (rus).

Information about the authors

Rahimbaev, Shark M. DSc, professor. E-mail: i_rahim@mail.ru.

Onoprienko, Natalya N. PhD, Assistant professor. E-mail: dstt_80@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rakhimbayev, Igor Sh. PhD.

Received 22.11.2021

Для цитирования:

Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Рахимбаев И.Ш. Термодинамический анализ процессов гидратации алюмоферрита кальция // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-82-88

For citation:

Rahimbaev Sh.M., Onoprienko N.N., Rahimbaev I.Sh. Thermodynamic analysis of hydration processes of calcium aluminoferrites. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-82-88

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102

Безмен П.А.

Юго-Западный государственный университет

E-mail: pbezmen@yahoo.com

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ

Аннотация. Процессом комплексирования информации называется объединение данных для определения текущего состояния объекта (процесса/системы) или прогнозирования его состояния. Комплексирование информации способствует увеличению робастности управления робототехнической или мехатронной системой, а также точности обработки информации системой. В работе рассматривается один из методов комплексирования бортовых данных робота на примере данных мобильного гусеничного робота. Основная цель статьи – продемонстрировать, как можно получить матрицы Якоби функции процесса и матрицы Якоби функции наблюдений системы мобильного робота для последующего комплексирования данных наблюдателем состояния, построенного на основе фильтра Калмана и выполняющего преобразование бортовых данных робота в элементы вектора состояния системы мобильного робота. Каждый ненулевой элемент матрицы Якоби функции наблюдений системы является весовым коэффициентом, определяющим вклад соответствующего этому весовому коэффициенту элемента вектора выхода системы в результат комплексирования информации, вычисляемого фильтром Калмана – наблюдателем состояния. Фильтр Калмана является рекуррентным алгоритмом фильтрации данных в дискретных системах, описанных в пространстве состояний. Особенностью фильтра Калмана как наблюдателя состояния некоторой системы является предположение, что на состояние системы оказывает воздействие гауссовский «белый» шум.

Ключевые слова: мобильный робот, комплексирование данных, робототехника, фильтр Калмана, матрица Якоби.

Введение. Системы управления движением мобильной робототехники являются сложными комплексами электронного оборудования, которое обеспечивает сбор и обработку информации о состоянии робота в целом и его отдельных подсистем, а также выполняет планирование действий мобильного робота и формирование управляющих приводами и актюаторами сигналов [1–3].

Сбор данных об окружающем мобильный робот пространстве в сочетании с воздействием робота на внешнюю среду (динамическое восприятие) по-прежнему остается лучшим способом восприятия недетерминированного пространства. Решающее значение имеет качество необработанной информации (данных), собранной от множества датчиков робота. Основными качественными свойствами информации являются: объективность, достоверность, полнота, точность, актуальность.

И.Л. Ермолов в своей работе [4] определяет комплексирование данных мобильным роботом как формирование обобщенной информации на основе более чем одного источника данных.

В системе мобильного робота процесс комплексирования данных датчиков осуществляется одним или более бортовыми вычислителями – процессорами и микроконтроллерами. Процес-

соры и микроконтроллеры дополнительно выполняют фильтрацию и нормализацию данных от отдельных датчиков.

Комплексирование данных увеличивает точность обработки информации бортовым вычислителем [5]. Комплексирование данных похоже на проведение эксперимента для того, чтобы установить итеративно значение некоторой величины с требуемой для эксперимента точностью. Входные данные (необработанные предварительно данные – англ. *raw data*) для дальнейшего комплексирования могут быть многомерными и иметь форму массивов размерностью (количеством измерений) m . Многие методы обработки данных размерностью m применимы для обработки данных, имеющих меньшую, чем m , размерность. Часто требуется предварительное преобразование информации разнотипных датчиков, так как их принципы действия основаны на разных физических эффектах.

Процесс комплексирования данных мобильной робототехнической системы предоставляет новую информацию, что не может быть реализовано отдельными датчиками мобильного робота. Данный метод делает возможным снизить количество каналов для передачи потоков данных, чем в случае использования индивидуальных каналов информации от каждого из датчиков,

также позволяет снизить требования к вычислительным мощностям бортовых вычислителей высшего уровня управления роботом.

Комплексирование данных может быть выполнено наблюдателями состояния, построенных на основе цифрового фильтра Калмана. Алгоритмы, реализующие работу цифрового фильтра Калмана, получили своё название в честь Р.Э. Калмана, который является одним из основных создателей этого фильтра [6]. Первые работы Р.Э. Калмана, описывающие работу фильтра, появились в 1959–1960 гг. Данный фильтр называют фильтром Стратоновича-Калмана-Бьюси, так как первый фильтр является частным случаем нелинейного фильтра, который был создан советским математиком Р.Л. Стратоновичем [7]. Р.Э. Калман и Р.С. Бьюси в 1960–1961 гг. опубликовали работы, описывающие фильтр для непрерывного времени [8, 9]. Фильтр Калмана представляет собой фильтр, имеющий бесконечную импульсную характеристику.

Алгоритм цифрового фильтра Калмана является рекуррентным алгоритмом фильтрации информации дискретных систем, описанных в пространстве состояний, и также может быть использован в качестве наблюдателя состояния процесса или системы. Алгоритм фильтра Калмана может обработать всю информацию, которая ему была предоставлена – это могут быть все измерения с разными уровнями точности, используемые для оценки текущих значений требуемых величин, при этом учитывая: знания о динамике всей системы и её измерительных устройств, статистическое описание шумов, действующих в системе, погрешности измерений, оценку неопределенности состояния динамической системы, любые доступные данные об исходных значениях интересующих величин. Алгоритм цифрового фильтра Калмана комплексировывает все доступные данные измерений, а также предшествующую (априорную) информацию о системе/процессе и работе измерительных устройств для получения оценки значений требуемых переменных так, чтобы была статистически минимизирована ошибка данной оценки.

Различные алгоритмы фильтра Калмана, в том числе алгоритм фильтра Калмана для нелинейных систем – расширенный фильтр Калмана (англ. *Extended Kalman filter* – *EKF*, далее РФК), широко применяется в навигационных системах различных наземных транспортных средств, надводных и подводных судов и кораблей, летательных и космических аппаратов, ракет, робототехнике. Так как для использования алгоритма РФК требования к вычислительной мощности бортовых вычислителей являются высокими, а также необходим большой объем оперативной

памяти для вычислений, долгое время алгоритм РФК имел незначительную, специализированную область применения [10].

РФК представляет собой субоптимальный алгоритм фильтрации данных, используемый, как правило, для работы с нелинейными системами. Отличием РФК от линейного фильтра Калмана является принятие нелинейной модели оцениваемой системы или процесса. РФК использует линеаризованные нелинейные функции состояния и наблюдений с последующим выполнением алгоритма линейного фильтра Калмана. Для алгоритма РФК с целью минимизации ошибок выполнения необходимо на стадии инициализации задать корректные начальные значения векторам и матрицам.

Использование алгоритма цифрового РФК в системе управления робототехнической системой позволяет осуществить фильтрацию и/или комплексирование данных для получения контекстных сведений о текущем состоянии системы/процесса робота [11–13].

Наблюдатель (наблюдатель состояния) – вычислитель значений элементов вектора состояния системы. Наблюдатели применяются в системах автоматического управления объектами, чьи математические модели описаны в пространстве состояний.

Пространство состояний – метрическое пространство, каждый элемент которого полностью определяет состояние системы или процесса во времени [14].

Порядок наблюдателя определяется числом элементов вектора состояния управляемого объекта, восстановленных и наблюдаемых в модели наблюдателя.

Опишем модель движения мобильного гусеничного робота как некоторой управляемой системы выражениями – уравнением (1) состояния системы и уравнением (2) наблюдений:

$$\mathbf{x}(k+1) = F(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = H(\mathbf{x}(k), k), \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(k)$ – вектор размерностью n состояния (системы);

$\mathbf{u}(k)$ – вектор размерностью e управления (воздействий на систему);

$\mathbf{y}(k)$ – вектор размерностью m выхода (системы);

$F(\bullet)$ – определяемая задачей комплексирования гладкая нелинейная векторная функция процесса (системы) размерностью n , имеющая частные производные первого порядка по всем переменным в окрестностях некоторой точки $(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$;

$H(\bullet)$ – определяемая задачей комплексирования гладкая нелинейная векторная функция наблюдений размерностью m , имеющая частные производные первого порядка по всем переменным в окрестностях некоторой точки $(\mathbf{x}(k))$;

k – некоторый текущий момент времени;

$(k + 1)$ – следующий момент времени.

Предположим, что данная нелинейная модель управляемой системы известна и может быть линеаризована посредством матриц Якоби [15, 16]:

$$\mathbf{J}_{F_x}(k) = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_{F_u}(k) = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial F_n(\bullet)}{\partial u_e} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)}, \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{H_x}(k) = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial H_m(\bullet)}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}(k)}, \quad (5)$$

где $\mathbf{J}_{F_x}(k)$ – квадратная матрица Якоби частных производных функции процесса (изменения состояния) по аргументу $\mathbf{x}$ (далее матрица Якоби уравнения состояния), размерность матрицы $n \times n$;

$\mathbf{J}_{F_u}(k)$ – прямоугольная матрица Якоби частных производных функции процесса (изменения состояния) по аргументу $\mathbf{u}$, размерность матрицы $n \times e$;

$\mathbf{J}_{H_x}(k)$ – прямоугольная матрица Якоби частных производных функции наблюдений по аргументу $\mathbf{x}$ (далее матрица Якоби уравнения наблюдений), размерность матрицы $m \times n$;

$\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ – элементы вектора $\mathbf{x}$;

$\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_e$ – элементы вектора $\mathbf{u}$;

$F_1(\bullet), \dots, F_n(\bullet)$ – элементы векторной функции $F(\bullet)$;

$H_1(\bullet), \dots, H_m(\bullet)$ – элементы векторной функции $H(\bullet)$.

Для задачи комплексирования РФК мы не учитываем управляющие воздействия $\mathbf{u}$ на систему, поэтому, используя матрицы (3) и (5), выражения (1) и (2) примут вид:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{J}_{F_x}(k) \cdot \mathbf{x}(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{J}_{H_x}(k) \cdot \mathbf{x}(k). \quad (7)$$

Добавив влияние шумов случайного процесса и измерения на систему, уравнения (1) и (2) запишем в виде выражений (8) и (9) соответственно:

$$\mathbf{x}(k+1) = F(\mathbf{x}(k), k) + \mathbf{w}(k), \quad (8)$$

$$\mathbf{y}(k) = H(\mathbf{x}(k), k) + \mathbf{v}(k), \quad (9)$$

где $\mathbf{w}(k)$ – вектор размерностью n модели шума случайного процесса, который описывает случайный характер изменения системы в момент (k) , подчиняется закону нормального распределения, и характеризуется ковариационной матрицей $\mathbf{Q}(k)$ – матрицей ковариаций шума процесса размерностью $n \times n$.

$\mathbf{v}(k)$ – вектор размерностью m модели шума измерения в момент (k) , характеризующегося ковариационной матрицей $\mathbf{R}(k)$ – матрицей ковариаций ошибок измерения размерностью $m \times m$.

Для функций $F(\bullet)$ и $H(\bullet)$ уравнений (8) и (9) справедливы выражения:

$$\mathbf{J}_{F_x}(k) = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial \mathbf{x}}, \quad \mathbf{J}_{H_x}(k) = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial \mathbf{x}}. \quad (10)$$

Комплексирование информации РФК выполняется заданными конкретной задачей функциями $H_1(\bullet), \dots, H_m(\bullet)$, являющихся элементами функции $H(\bullet)$:

$$H(\bullet) = \begin{bmatrix} H_1(x_1, \dots) \\ H_2(\dots, x_2, \dots) \\ \dots \\ H_m(\dots, x_n) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ – элементы вектора $\mathbf{x}$,

$H_1(\bullet), \dots, H_m(\bullet)$ – нелинейные функции всех или части элементов $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$.

Каждый ненулевой элемент матрицы $\mathbf{J}_{Hx}(k)$ является весовым коэффициентом (весом), определяющим вклад соответствующего этому весовому коэффициенту элемента вектора $\mathbf{y}(k)$ в результат комплексирования информации, вычисляемого расширенным фильтром Калмана – наблюдателем состояния.

Постановка задачи. В настоящее время сфера применения мобильной робототехники, обладающей гусеничным движителем, чрезвычайно широка и объясняется очевидными преимуществами гусеничного движителя, среди которых можно выделить: надежность и относительную простоту конструкции движителя, высокие маневренность, проходимость, грузоподъемность. Перечисленные преимущества сделали

транспортные средства, построенные на основе гусеничных шасси преобладающими для использования по бездорожью.

Мобильный робот с гусеничным движителем перемещается в плоскости прямоугольной системы координат XOY (рис. 1). Цифрами на схеме навигации мобильного робота (рис. 1) обозначены: 1 – корпус робота, 2 – левая гусеница робота, 3 – правая гусеница робота. Точкой C обозначен геометрический центр робота. Величина B является расстоянием между продольными осями левой и правой гусениц мобильного робота. Местоположение робота на плоскости определяет и задает командный центр, оснащенный стационарным лидаром. Данный лидар установлен в точке O прямоугольной системы координат XOY .

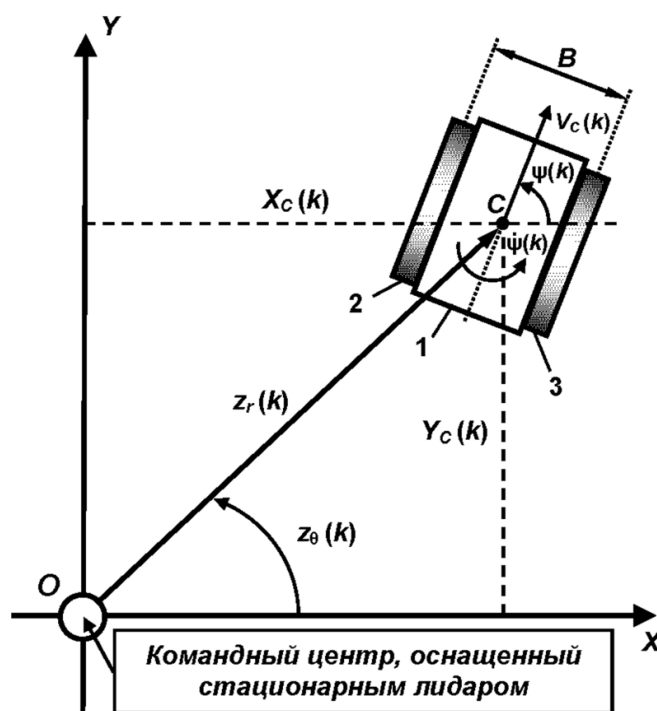


Рис. 1. Схема навигации мобильного робота с гусеничным движителем

Командный центр отправляет бортовой системе управления роботом значения требуемых координат положения корпуса робота, формируя, таким образом, требуемую траекторию движения робота. В задаче не рассматривается возможность скольжения гусениц по опорной поверхности. Принимается, что робот перемещается по опорной поверхности, обладающей постоянной и равномерно зернистой шероховатостью. Командный центр определяет текущие координаты робота и задает его требуемые координаты в полярной системе координат. Требуемые координаты положения робота имеют формат:

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} z_r(k) \\ z_\theta(k) \end{bmatrix},$$

где k – текущий момент времени;

$z_r(k)$ – расстояние OC от лидара командного центра до мобильного робота (радиальная координата);

$z_\theta(k)$ – угол между осью OX и прямой OC (угловая координата).

Бортовая система управления роботом преобразует данные, полученные от командного центра, в требуемые прямоугольные координаты X_C и Y_C геометрического центра C мобильного робота (рис. 1):

$$\begin{aligned} X_C(k) &= z_r(k) \cdot \cos(z_\theta(k)), \\ Y_C(k) &= z_r(k) \cdot \sin(z_\theta(k)) \end{aligned} \quad (12)$$

Скорость вращения $\dot{\psi}(k)$ корпуса робота относительно точки C вычисляется, следуя выражению:

$$\dot{\psi}(k) = \frac{\psi(k) - \psi(k-1)}{\Delta T}, \quad (13)$$

где $(k-1)$ – предыдущий момент времени;

ΔT – период времени между моментом времени $(k-1)$ и моментом времени k ;

$\psi(k)$ – угол поворота вектора линейной скорости V_C центра корпуса мобильного робота относительно оси OX в текущий момент времени k ;

$\psi(k-1)$ – угол поворота вектора линейной скорости V_C центра корпуса мобильного робота относительно оси OX в предыдущий момент времени.

Величина $\psi(k)$ вычисляется следующим образом:

$$\psi(k) = \arctan\left(\frac{V_{C_y}(k)}{V_{C_x}(k)}\right), \quad (14)$$

где $V_{C_x}(k)$ и $V_{C_y}(k)$ – проекции вектора линейной скорости V_C центра корпуса робота на оси OX и OY соответственно:

$$\begin{aligned} V_{C_x}(k) &= \frac{X_C(k) - X_C(k-1)}{\Delta T}, \\ V_{C_y}(k) &= \frac{Y_C(k) - Y_C(k-1)}{\Delta T} \end{aligned} \quad (15)$$

где ΔT – период времени между моментом времени $(k-1)$ и моментом времени k .

Значение скорости V_C центра корпуса робота может быть найдено, используя одно из выражений:

$$\begin{aligned} V_C(k) &= \frac{V_{C_x}(k)}{\cos(\psi(k))}, \\ V_C(k) &= \frac{V_{C_y}(k)}{\sin(\psi(k))} \end{aligned} \quad (16)$$

Вектор состояния $\mathbf{x}(k)$ определим следующим образом:

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{cp}(k) \\ \omega_{\Sigma}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_L(k) + \omega_R(k)}{2} \\ -\omega_L(k) + \omega_R(k) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где

$$\omega_{cp}(k) = \frac{\omega_L(k) + \omega_R(k)}{2} = \frac{1}{2} \frac{(V_L + V_R)}{R} = \frac{V_C(k)}{R}, \quad (18)$$

$$\omega_{\Sigma}(k) = -\omega_L(k) + \omega_R(k) = \frac{B}{R} \cdot \dot{\psi}(k). \quad (19)$$

Величины $\omega_L(k)$ и $\omega_R(k)$ являются угловыми скоростями вращения ведущих колес левой и правой гусениц робота соответственно. В выражении (18) величинами V_L и V_R обозначены линейные скорости движения звеньев левой и правой гусениц соответственно относительно корпуса робота.

Таким образом, элементы вектора оценки состояния $\hat{\mathbf{x}}(k)$ обозначим как

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_0(k) \\ \hat{x}_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{cp}(k) \\ \hat{\omega}_{\Sigma}(k) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Величина $\omega_{cp}(k)$ представляет собой среднее арифметическое значений $\omega_L(k)$ и $\omega_R(k)$, а величина $\omega_{\Sigma}(k)$ является их суммой, причем

в данной сумме значение $\omega_L(k)$ участвует с противоположным знаком.

Величина R – радиус ведущих колес левой и правой гусениц робота.

Задача заключается в получении матрицы Якоби $\mathbf{J}_{F_x}(k)$ функции процесса и матрицы Якоби $\mathbf{J}_{H_x}(k)$ функции наблюдений для комплексов величин $\omega_L(k)$ и $\omega_R(k)$ в элементы вектора состояния $\mathbf{x}(k)$.

Решение задачи. Вектор выхода системы $\mathbf{y}(k)$ определим следующим образом:

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_0(k) \\ y_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_L(k) \\ \omega_R(k) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Определим векторную функцию процесса $F(\mathbf{x}(k))$ и векторную функцию наблюдений $H(\mathbf{x}(k))$:

$$F(\mathbf{x}(k)) = \begin{bmatrix} F_0(\mathbf{x}(k)) \\ F_1(\mathbf{x}(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{cp}(k) \\ \omega_{\Sigma}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(k) \\ x_1(k) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$H(\mathbf{x}(k)) = \begin{bmatrix} H_0(\mathbf{x}(k)) \\ H_1(\mathbf{x}(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_L(k) \\ \omega_R(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2 \cdot \omega_{cp}(k) - \omega_{\Sigma}(k)}{2} \\ \frac{2 \cdot \omega_{cp}(k) + \omega_{\Sigma}(k)}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2 \cdot x_0(k) - x_1(k)}{2} \\ \frac{2 \cdot x_0(k) + x_1(k)}{2} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Получим матрицу Якоби $\mathbf{J}_{F_x}(k)$ функции процесса и матрицу Якоби $\mathbf{J}_{H_x}(k)$ функции наблюдений:

$$\mathbf{J}_{F_x}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_0(\mathbf{x}(k))}{\partial x_0} & \frac{\partial F_0(\mathbf{x}(k))}{\partial x_1} \\ \frac{\partial F_1(\mathbf{x}(k))}{\partial x_0} & \frac{\partial F_1(\mathbf{x}(k))}{\partial x_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$\mathbf{J}_{H_x}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_0(\mathbf{x}(k))}{\partial x_0} & \frac{\partial H_0(\mathbf{x}(k))}{\partial x_1} \\ \frac{\partial H_1(\mathbf{x}(k))}{\partial x_0} & \frac{\partial H_1(\mathbf{x}(k))}{\partial x_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,5 \\ 1 & 0,5 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

В решении рассматриваемой задачи элементы матриц Якоби $\mathbf{J}_{F_x}(k)$ и $\mathbf{J}_{H_x}(k)$ являются постоянными.

Для вычисления действительных значений координат положения робота в системе координат XOY воспользуемся следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \psi_{C_d}(k) &= \psi_{C_d}(k-1) + \left[\frac{R}{B} \cdot \hat{x}_1(k) \cdot \Delta T \right] = \\ &= \psi_{C_d}(k-1) + \left[\frac{R}{B} \cdot \hat{\omega}_{\Sigma}(k) \cdot \Delta T \right], \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} X_{C_d}(k) &= X_{C_d}(k-1) + \left[R \cdot \hat{x}_0(k) \cdot \cos(\psi_{C_d}(k)) \cdot \Delta T \right] = \\ &= X_{C_d}(k-1) + \left[R \cdot \hat{\omega}_{cp}(k) \cdot \cos(\psi_{C_d}(k)) \cdot \Delta T \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Y_{C_d}(k) &= Y_{C_d}(k-1) + \left[R \cdot \hat{x}_0(k) \cdot \sin(\psi_{C_d}(k)) \cdot \Delta T \right] = \\ &= Y_{C_d}(k-1) + \left[R \cdot \hat{\omega}_{cp}(k) \cdot \sin(\psi_{C_d}(k)) \cdot \Delta T \right] \end{aligned} \quad (28)$$

где $\psi_{C_d}(k)$ и $\psi_{C_d}(k-1)$ – действительные значения угла поворота вектора линейной скорости $V_C(k)$ центра корпуса мобильного робота относительно оси OX в текущий момент времени k и предыдущий момент времени $(k-1)$ соответственно;

$X_{C_d}(k)$ и $X_{C_d}(k-1)$ – действительные значения координаты X центра корпуса робота в текущий момент времени k и предыдущий момент времени $(k-1)$ соответственно;

$Y_{C_d}(k)$ и $Y_{C_d}(k-1)$ – действительные значения координаты Y центра корпуса робота в текущий момент времени k и предыдущий момент времени $(k-1)$ соответственно.

Практическая реализация. Для проведения вычислительных и натурных экспериментов

комплексирования бортовых данных мобильного робота был разработан стенд системы управления мобильным роботом, выполняющей комплексирование бортовых данных (рис. 2), главными составляющими частями которого являются четыре модуля системы управления и плата межсоединений (шин) модулей системы управления.

Комплексирование бортовых данных мобильного робота может выполняться каждым устройством – *модулем*, подключенным к шине команд и шине данных системы управления мобильным роботом [17]. Каждый такой модуль системы управления содержит несколько вычислителей (например, многоядерный процессор/микроконтроллер), обеспечивающих выполнение функций, основными из которых являются:

- опрос датчиков физических величин,

- запись, хранение, чтение и копирование данных энергозависимой и энергонезависимой памяти,
- отправка и прием команд,
- отправка и прием данных,
- комплексирование данных, хранящихся в регистрах одного модуля,
- выполнение заданных математических операций над регистрами данных одного модуля,
- интерфейс для подключения приемо-передающего устройства для передачи команд и данных между модулем системы управления и внешним устройством (например, персональным компьютером),
- настройка работы некоторого модуля системы управления каким-либо другим устройством в т.ч. внешним в соответствии с задачей управления,

- линейное масштабирование значений регистров данных в соответствии с задачей управления,
- управление исполнительными устройствами (актюаторами и приводами) по команде от другого модуля системы управления или автоматическое (по результатам комплексирования данных или математических операций над регистрами данных одного модуля).

В каждом модуле системы управления часть регистров данных, в соответствии с текущими настройками конкретного модуля, участвует в процессе комплексирования данных: резервируются регистры для входных данных (элементов вектора выхода системы) и выходных данных (результатов комплексирования – элементов вектора оценки состояния системы) процедуры комплексирования.

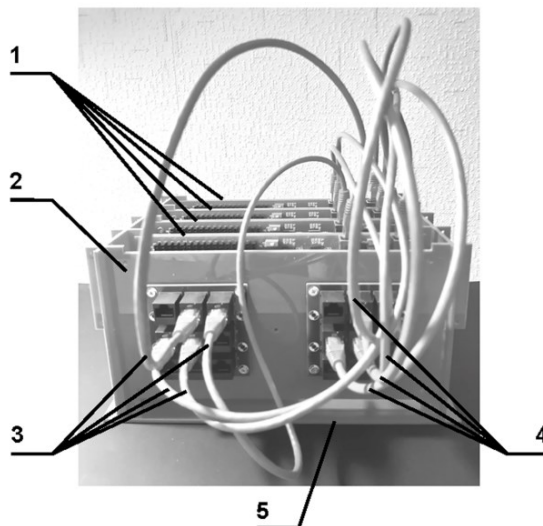


Рис. 2. Экспериментальный стенд системы управления мобильным роботом:
1 – модули системы управления, 2 – плата межсоединений модулей системы управления,
3 – кабели шины данных, 4 – кабели шины команд, 5 – корпус-стойка

В состав каждого из четырех модулей системы управления входят (рис. 3):

- 1) материнская плата модуля,
- 2) плата Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D с двухъядерным цифровым сигнальным контроллером TMS320F28379D,
- 3) группа разъемов для подключения до 12 силовых (драйверных) схем управления актюаторами/приводами,
- 4) группа разъемов для подключения до 16 аналоговых датчиков физических величин с напряжениями электропитания 3,3 В и 5 В,
- 5) микросхема энергонезависимой сегнетоэлектрической оперативной памяти (*F-RAM* – англ. *ferroelectric random access memory*) Cypress FM24CL64B-G объемом 64 кбит (8 кбайт) с напряжением электропитания 3,3 В,

- 6) группа разъемов интерфейса I²C с напряжением электропитания 3,3 В для подключения до 2 внешних устройств,

- 7) микросхема последовательной энергонезависимой памяти – электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (*EEPROM* – англ. *electrically erasable programmable read-only memory*) Microchip 24LC256-I/P объемом 256 кбит (32 кбайт) с напряжением электропитания 3,3 В,

- 8) разъем 8P8C (англ. *8 Position 8 Contact* – 8-ми позиционный 8-ми контактный) для подключения модуля к шине данных системы управления,

- 9) DIP-переключатель для задания индивидуального 4-битного адреса модуля в рамках системы управления,

- 10) разъем 8P8C для подключения модуля к шине команд системы управления,

11) микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485 Maxim Integrated MAX3485EPA с напряжением электропитания 3,3 В,

12) группа разъемов интерфейса SCI/UART с напряжением электропитания 3,3 В для подключения до 2 внешних устройств.

Структурная схема модуля системы управления приведена на рис. 4. Основой модуля является цифровой сигнальный контроллер Texas Instruments TMS320F28379D, установленный на отладочной плате Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D.

Основные характеристики контроллера TMS320F28379D:

- гарвардская архитектура,
- два вычислительных ядра (процессора) и два программируемых математических сопроцессора (компания Texas Instruments для данных

сопроцессоров ввела название *Control Law Accelerator – CLA*),

- максимальное быстродействие: 800 MIPS (англ. *million instructions per second* – миллион операций в секунду),

- максимальная частота работы: 200 МГц,

- поддержка MAC-операций (операций совмещенного умножения-сложения, англ. *multiply-accumulate operation*) над 16- и 32-разрядными числами.

Периферийными устройствами, установленными на плате модуля, являются микросхемы энергонезависимой памяти и микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485, подключенные к контроллеру TMS320F28379D посредством интерфейсов I²C и SCI/UART соответственно (рис. 4).

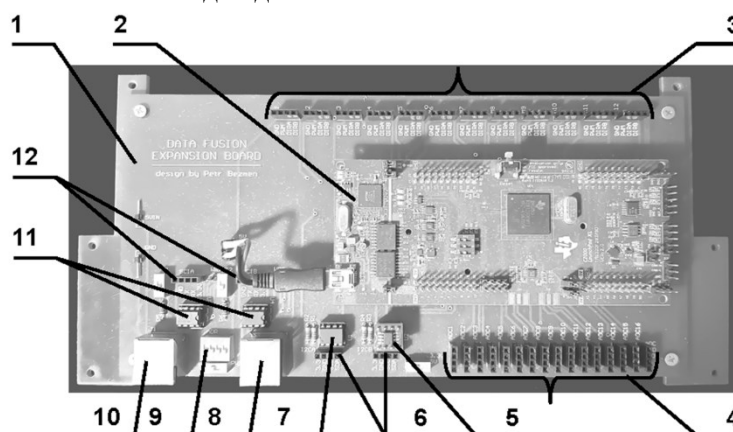


Рис. 3. Модуль системы управления мобильным роботом

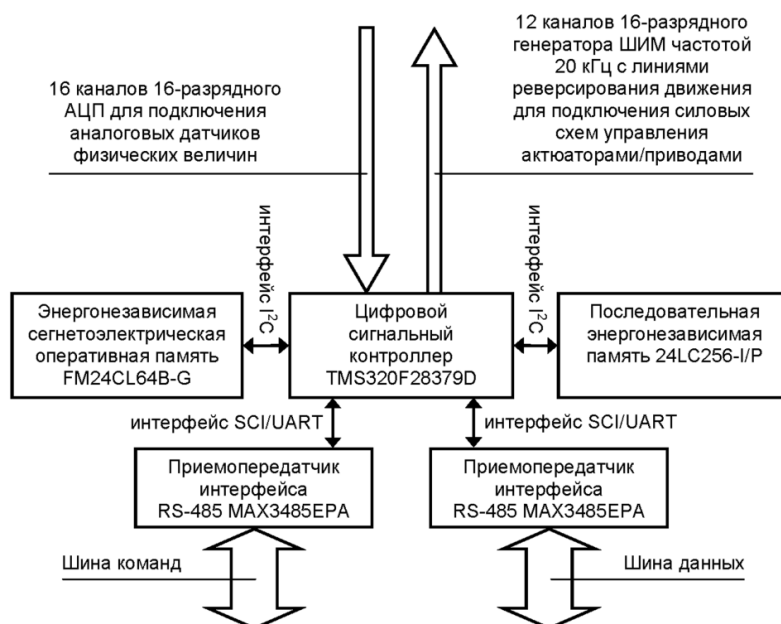


Рис. 4. Структурная схема модуля системы управления

Шина команд и шина данных модулей системы управления реализованы с использованием аппаратного последовательного интерфейса RS-485 стандарта ANSI TIA/EIA-485 (англ. *ANSI – American National Standards Institute* –

Американский национальный институт стандартов, англ. *TIA/EIA – Telecommunications Industry Association and Electronic Industries Alliance* – Ассоциация телекоммуникационной отрасли и Альянс электронной промышленности). Физический

уровень данного интерфейса – дифференциальный сигнал, передающийся по «витой» паре проводов: неинвертирующей линии (А) и инвертирующей линии (В), что обеспечивает высокую устойчивость передаваемого сигнала к синфазной помехе. Шина команд и шина данных кроме неинвертирующей и инвертирующей линий интерфейса RS-485 включают в себя линии электропитания модулей системы управления: 0 В

(«земля») и +5 В (рис. 5). Каждый модуль имеет возможность получать электропитание посредством шины команд и/или шины данных, а также имеет выводы для подключения внешнего источника электропитания напряжением 5 В. При подключении внешнего источника электропитания модуль передает электропитание на остальные модули через шину команд и/или шину данных.

← К разъему 8P8C модуля		К разъему 8P8C платы межсоединений →	
№ вывода	Назначение вывода	№ вывода	Назначение вывода
1	+5 В (электропитание модулей)	1	+5 В (электропитание модулей)
2	не подключен	2	не подключен
3	0 В («земля»)	3	0 В («земля»)
4	В (инвертирующая линия RS-485)	4	В (инвертирующая линия RS-485)
5	А (неинвертирующая линия RS-485)	5	А (неинвертирующая линия RS-485)
6	0 В («земля»)	6	0 В («земля»)
7	не подключен	7	не подключен
8	+5 В (электропитание модулей)	8	+5 В (электропитание модулей)

Рис. 5. Назначение выводов кабелей шины команд и шины данных модулей системы управления

Для подключения персонального компьютера к отдельному модулю или группе модулей системы управления (например, с целью управления модулем или для его настройки) применяется преобразователь интерфейса USB (англ. *Universal Serial Bus* – универсальная последова-

тельная шина) в интерфейс шин модулей системы управления (RS-485) (рис. 6). Данный преобразователь интерфейса подключается к одному из разъемов 8P8C платы межсоединений модулей системы управления (рис. 2) или к одному из разъемов 8P8C модуля системы управления 8, 10 (рис. 3).

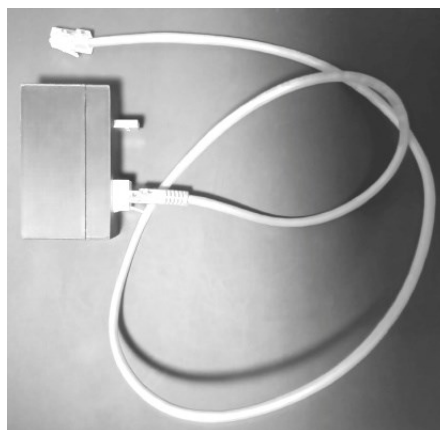


Рис. 6. Преобразователь интерфейса USB в интерфейс шин модулей системы управления с максимальным значением напряжения сигнала 3,3 В

Максимальная скорость передачи данных приемопередатчиками MAX3485EPA интерфейса RS-485 составляет 10 Мбит/сек (1,25 Мбайт/сек). Интерфейсы SCI/UART контроллера TMS320F28379D каждого модуля программно настроены на скорость передачи данных, равную 115200 бит/сек ($\approx 0,014$ Мбайт/сек) – данная скорость используется из-за её поддержки большинством современных коммуникационных устройств.

В рамках системы управления каждому модулю присваивается индивидуальный 4-битный адрес, используемый для идентификации модуля при передаче команд и данных по соответствующим информационным шинам. Данный адрес задается аппаратно с помощью DIP-переключателя 9 (рис. 3). Диапазон возможных адресов каждого модуля – от 0 до 15. Для внешних управляющих устройств (например, персонального компьютера) зарезервирован адрес 255. Максимальное

число индивидуальных адресов устройств, одновременно включенных в систему управления, равно 255: адреса от 0 до 255. При назначении одинаковых адресов группе модулей возможна широкоэмиттерная передача информации от модуля или внешнего управляющего устройства, которые подключены к шине команд и/или шине данных, данной группе.

Все типы памяти – оперативной и энергонезависимой (кроме flash-памяти контроллера TMS320F28379D, предназначенной для хранения управляющей микропрограммы) модулей имеют организацию в виде регистров (ячеек). Размер каждого регистра равен 5 байт.

Модуль системы управления обладает группой разъемов 3 (рис. 3) для подключения до 12 силовых (драйверных) схем управления актюаторами/приводами. Каждый разъем включает в себя выводы:

- «GND» (сокр. англ. *ground* – «земля») – 0 В,
- «PWM» (англ. *pulse-width modulation* – широтно-импульсная модуляция) – вывод одного из

каналов встроенного в контроллер TMS320F28379D 16-разрядного генератора ШИМ частотой 20 кГц,

- «DIRA» (сокр. англ. *direction A* – направление A) – вывод линии реверсирования движения актюатора/привода,

- «DIRB» (сокр. англ. *direction B* – направление B) – вывод линии реверсирования движения актюатора/привода.

На выводы «DIRA» и «DIRB» поступают сигналы с напряжением логического уровня LVTTTL (англ. *Low voltage TTL* – транзисторно-транзисторная логика с низким напряжением) относительно вывода «GND», где: напряжение 0...0,4 В соответствует логическому «нулю», а напряжение 2,4...3,3 В соответствует логической «единице». Комбинации значений сигналов логического уровня LVTTTL на выводах «DIRA» и «DIRB» и соответствующие им направления движения актюатора/привода приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Комбинации значений сигналов логического уровня на выводах «DIRA» и «DIRB»
и соответствующие им направления движения актюатора/привода**

Значение сигнала логического уровня на выводе «DIRA»	Значение сигнала логического уровня на выводе «DIRB»	Направление движения актюатора/привода
0	0	движение отсутствует
1	0	прямое движение
0	1	обратное (реверсное) движение

Модуль системы управления оснащен группой разъемов 4 (рис. 3) для подключения до 16 аналоговых датчиков физических величин с напряжениями электропитания 3,3 В и 5 В. Каждый разъем включает в себя выводы:

- «ADC» (ADC – англ. *analog-to-digital converter* – аналого-цифровой преобразователь, АЦП) – вывод одного из 16 каналов 16-разрядного встроенного в контроллер TMS320F28379D аналого-цифрового преобразователя,
- «GND» (сокр. англ. *ground* – «земля») – 0 В,
- «3.3V» – +3,3 В для электропитания аналогового датчика относительно вывода «GND»,
- «5V» – +5 В для электропитания аналогового датчика относительно вывода «GND».

Для проведения эксперимента с применением рассматриваемой системы управления для мобильного робота с гусеничным движителем была выбрана требуемая траектория движения робота (рис. 7), насчитывающая 8000 точек, и принимались следующие параметры:

– радиус ведущих колес левой и правой гусениц робота $R = 0,12$ м;

– максимальная угловая скорость вращения ведущих колес гусениц робота

$$\omega_{max} = 2 \text{ рад/с (19 об/мин);}$$

– расстояние между продольными осями левой и правой гусениц мобильного робота $B = 0,5$ м (рис. 1).

Для РФК были заданы ковариационные матрицы $Q(k)$ и $R(k)$ [12], являющиеся диагональными и скалярными со значениями своих ненулевых элементов, равными 10^{-5} .

В данной системе управления мобильным роботом РФК является наблюдателем состояния $x(k)$ (17) робота. Текущие значения скоростей $\omega_L(k)$ и $\omega_R(k)$ определяются датчиками – энкодерами, установленными на валах ведущих колес гусениц робота.

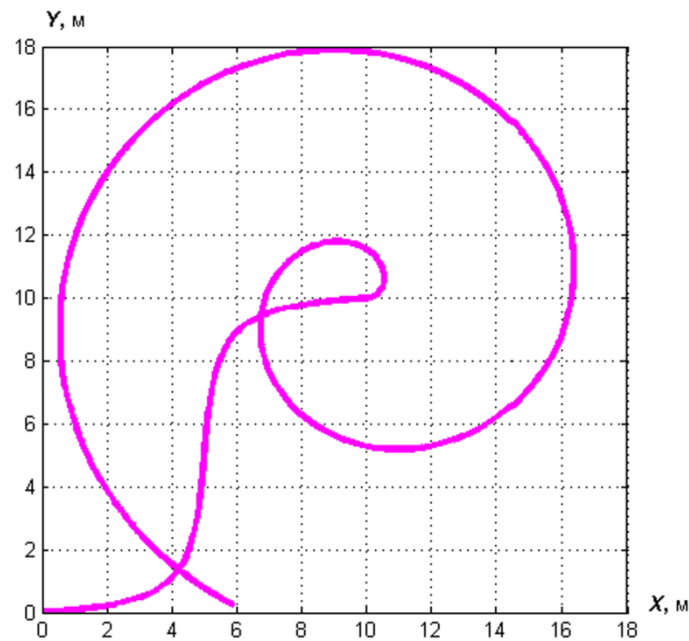


Рис. 7. Требуемая траектория движения робота, сформированная отдельными точками

Результаты эксперимента представлены абсолютными значениями ошибок E_{X_c} и E_{Y_c} , определяемых как

$$E_{X_c}(p) = |X_c(p) - X_{c_d}(p)|, \quad (29)$$

$$E_{Y_c}(p) = |Y_c(p) - Y_{c_d}(p)|, \quad (30)$$

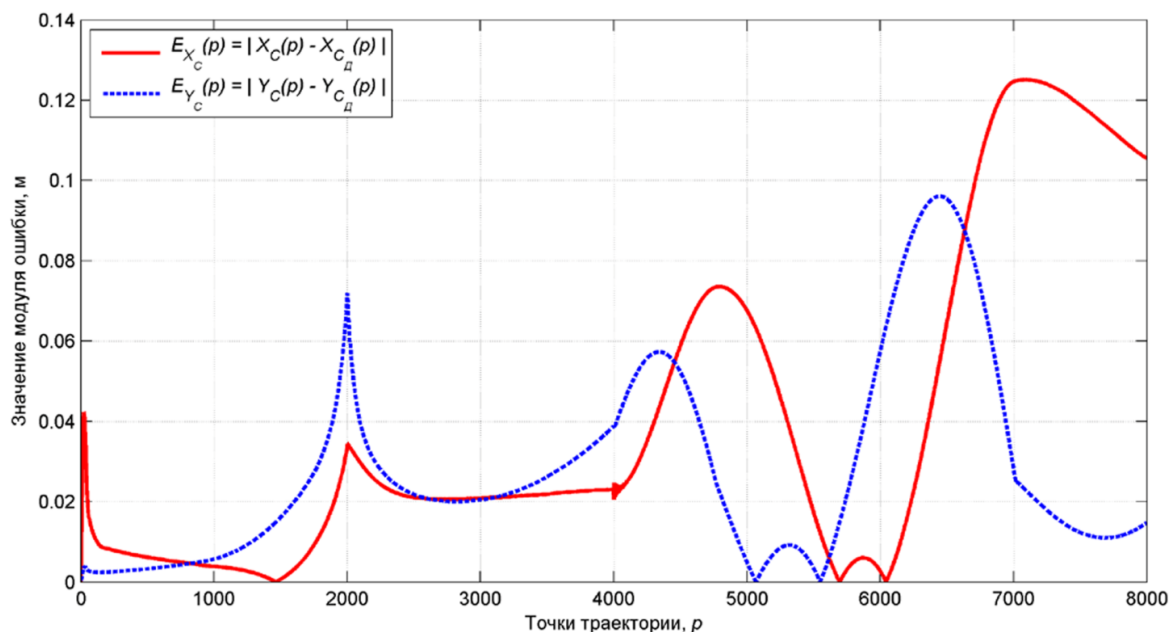
где $X_c(p)$ и $Y_c(p)$ – требуемые координаты X и Y центра корпуса робота соответственно;

$X_{c_d}(p)$ и $Y_{c_d}(p)$ – действительные значения координат X и Y центра корпуса робота соответственно;

p – некоторая точка требуемой/действительной траектории;

$|\cdot|$ – операция определения абсолютной величины (модуля) некоторого числа.

Неравномерность значений E_{X_c} и E_{Y_c} (рис. 8) объясняется различной кривизной требуемой траектории движения мобильного робота (рис. 7).

Рис. 8. Значения E_{X_c} и E_{Y_c}

Выводы. Широкое внедрение комплексной обработки информации в системах управления

робототехническими системами позволяет интенсифицировать информационно-алгоритмическое направление обеспечения и повышения автономности мобильных роботов.

Цифровые линейный и расширенный фильтры Калмана во время своей работы делают большой объем вычислений. При работе расширенного фильтра Калмана существенно увеличиваются требования к вычислительной мощности бортового вычислительного устройства робота по сравнению с функционированием линейного фильтра Калмана. Повышение размерностей векторов и матриц приводит к росту вычислительных затрат на работу алгоритма.

Каждый отличный от нуля элемент матрицы $\mathbf{J}_{\mathbf{H}_x}(k)$ является весовым коэффициентом (весом), определяющим вклад соответствующего этому весовому коэффициенту элемента вектора $\mathbf{y}(k)$ в результат комплексирования информации, вычисляемого фильтром Калмана – наблюдателем состояния $\hat{\mathbf{x}}$. Расположение ненулевых элементов в матрице $\mathbf{J}_{\mathbf{H}_x}(k)$ определяется задачей комплексирования информации.

Для выполнения успешного процесса комплексирования (объединения) данных требуются:

- соответствующие наблюдаемым физическим величинам данные,
- достаточные частота опроса информации от датчиков физических величин и разрешающая способность датчиков,
- высокие диапазоны измеряемых датчиками величин и надежность датчиков,
- при использовании наблюдателей, построенных на основе фильтров Калмана, наличие в сигналах датчиков шумов, вероятность которых соответствует закону нормального распределения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: учебное пособие. Москва: МГТУ «Станкин», 2000. 105 с.
2. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 100 с.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1978. 400 с.
4. Ермолов И.Л. Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных: диссертация доктора технических наук. Москва, 2012 г. 350 с.
5. White F.E. Data Fusion Lexicon. The Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, Naval Ocean Systems Center, San Diego, 1991. 13 p.
6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82 (1). Pp. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.
7. Стратонович Р.Л. К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций // Теория вероятностей и ее применения. 1959. Т. 4, № 2. С. 239–242.
8. Kalman R.E., Bushy R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83 (1). Pp. 95–108. DOI: 10.1115/1.3658902.
9. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, 2001. 584 p.
10. Волинский М.А., Гуров И.П., Ермолаев П.А., Скаков П.С. Анализ вычислительной сложности рекуррентных алгоритмов обработки данных в оптической когерентной томографии // Вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. №6. С. 35–40.
11. Безмен П.А. Алгоритм фильтра Калмана для комплексирования данных в системе управления мобильным роботом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2019. №3. С. 82–87.
12. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №2. С. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64.
13. Dailey D.J., Harn P., Lin P.-J. ITS Data Fusion: Final Research Report, Research Project T9903. Washington State Department of Transportation, 1996, 103 p.
14. Александров А.Г., Артемьев В.М., Афанасьев В.Н., Ашимов А.А., Белоглазов И.И., Буков В.Н., Земляков С.Н., Казакевич В.В., Красовский А.А., Медведев Г.А., Растринин Л.А., Рутковский В.Ю., Юсупов Р.М., Ядыкин И.Б., Якубович В.А. Справочник по теории автоматического управления. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.
15. Певзнер Л.Д. Теория систем управления. Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. 472 с.

16. Gyorgy K. The LQG Control Algorithms for Nonlinear Dynamic Systems // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. Pp. 553–563. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.252.

17. Пат. 2715370, Российская Федерация, МПК G 05 B15/02. Архитектура системы управ-

ления мобильным роботом / П.А. Безмен; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ). № 2019108807; заявл. 27.03.2019; опубл. 26.02.2020, Бюл. № 6. 11 с.

Информация об авторах

Закнева Лилия Фаритовна, кандидат архитектуры, старший преподаватель кафедры градостроительства и планировки сельских населенных мест. E-mail: zakievalily@gmail.com. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1.

Поступила 05.11.2021 г.

© Безмен П.А., 2022

Bezmen P.A.

Southwest State University
E-mail: pbezmen@yahoo.com

AN INTEGRATION OF A MOBILE TRACKED ROBOT CONTROL SYSTEM DATA

Abstract. *Integration of information – the process of combining data to determine or predict the state of an object. The integration provides an increase in the robustness of the robot control and the accuracy of machine perception of information. The paper discusses one of the methods for integrating of the robot onboard data using the example of the mobile tracked robot data. One of the aim is showing how to obtain the Jacobi matrix of the process function and the Jacobi matrix of the observation function of the mobile robot system for subsequent data integration by the state observer, built on the basis of the Kalman filter, that can convert the robot onboard data into the elements of the state vector of the mobile robot system. Each nonzero element of the Jacobi matrix of the observation function of the system is a weight coefficient. It determines the contribution of an element of the output vector of the system corresponding to this weight coefficient to the result of information integration calculated by the Kalman filter – the state observer. The Kalman filter is a sequential recurrent algorithm for filtering information from discrete dynamical systems specified in the state space. A feature of the Kalman filter as an observer of the state of the system is the assumption that the observed system has the effect of white Gaussian noise (characterized by zero mathematical expectation) on its state.*

Keywords: *mobile robot, data integration, robotics, Kalman filter, Jacobi matrix.*

REFERENCES

1. Poduraev Yu.V. Fundamentals of Mechatronics: textbook [Osnovy mekhatroniki: uchebnoye posobiye]. Moscow: MSTU "Stankin", 2000. 105 p. (rus)
2. Yurevich E.I. Sensor systems in robotics: textbook [Sensornyye sistemy v robototekhnike: uchebnoye posobiye]. St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. University, 2013. 100 p. (rus)
3. Buslenko N.P. Modeling complex systems [Modelirovaniye slozhnykh sistem]. Moscow: Nauka, 1978. 400 p. (rus)
4. Ermolov I.L. Expanding the functionality of mobile technological robots by increasing the level of their autonomy with the use of hierarchical integrated processing of onboard data: Doctor of Science thesis [Rasshireniye funktsional'nykh vozmozhnostey mobil'nykh tekhnologicheskikh robotov putem povysheniya urovnya ikh avtonomnosti s ispol'zovaniyem iyerarkhicheskoy kompleksnoy

obrabotki bortovykh dannykh: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk]. Moscow, 2012. 350 p. (rus)

5. White F.E. Data Fusion Lexicon. The Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, Naval Ocean Systems Center, San Diego, 1991. 13 p.

6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers). Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82 (1). Pp. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.

7. Stratonovich R.L. On the theory of optimal nonlinear filtering of random functions [K teorii optimal'noy nelineynoy fil'tratsii sluchaynykh funktsiy]. Probability theory and its applications. 1959. Vol. 4, No. 2. Pp. 239–242. (rus)

8. Kalman R.E., Busy R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers). Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83 (1). Pp. 95–108. DOI: 10.1115/1.3658902.

9. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, 2001. 584 p.

10. Volynsky M.A., Gurov I.P., Ermolaev P.A., Skakov P.S. Analysis of the computational complexity of recurrent data processing algorithms in optical coherence tomography [Analiz vychislitel'noy slozhnosti rekurrentnykh algoritmov obrabotki dannykh v opticheskoy kogerentnoy tomografii]. Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics, 2014. No. 6. Pp. 35–40. (rus)

11. Bezmen P.A. The Kalman filter algorithm for data fusion of a mobile robot control system [Algoritm fil'tra Kalmana dlya kompleksirovaniya dannykh v sisteme upravleniya mobil'nym robotom]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2019. No. 3. Pp. 82–87. (rus)

12. Bezmen P.A. Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter [Kompleksirovaniye dannykh sistemy uprav-

leniya mobil'nym robotom s ispol'zovaniyem ras-shirennogo fil'tra Kalmana]. Proceedings of the Southwest State University. 2019/ No. 2. Pp. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64 (rus)

13. Dailey D.J., Harn P., Lin P.-J. ITS Data Fusion: Final Research Report, Research Project T9903. Washington State Department of Transportation, 1996. 103 p.

14. Krasovsky A.A. et al. Handbook on the theory of automatic control [Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya]. Moscow: Science. Main editorial office phys.-math. literature, 1987. 712 p. (rus)

15. Pevzner L.D. Theory of control systems [Teoriya sistem upravleniya]. Moscow: Publishing house of the Moscow State Mining University, 2002, 472 p. (rus)

16. Gyorgy K. The LQG Control Algorithms for Nonlinear Dynamic Systems. Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. Pp. 553–563. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.252.

17. Bezmen P.A. Architecture of mobile robot control system. Patent RF, no. 2715370, 2020.

Information about the authors

Bezmen, Petr A. PhD. E-mail: pbezmen@yahoo.com. Southwest State University, Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received 05.11.2021

Для цитирования:

Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным гусеничным роботом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 89–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102

For citation:

Bezmen P.A. An integration of a mobile tracked robot control system data. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No.3. Pp. 89–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-103-111

Бусаров С.С., *Кобыльский Р.Э., Сеницин Н.Г.

Омский государственный технический университет

*E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ МАНЖЕТНОГО УПЛОТНЕНИЯ РАБОТАЮЩЕГО БЕЗ СМАЗКИ

Аннотация. Как показал проведенный литературный обзор, на данный момент времени, практически полностью отсутствуют рекомендации по выбору толщины стенки манжетного L-образного уплотнения работающего, преимущественно, в условиях сухого трения. От правильного выбора толщины стенки уплотнения, будет зависеть ресурс работы всего компрессорного агрегата. В данной работе рассмотрены рекомендации по проектированию манжетного цилиндропоршневого уплотнения. Представлены основные расчетные формулы по выбору минимальной толщины стенки, также представлены граничные условия при выборе максимальной толщины стенки. На базе пакетных программ ANSYS были проведены проверочные расчеты расчетных толщин стенок при различных давлениях в рабочей камере при средней температуре – плюс 55 °С. Давление в рабочей камере варьировалось от 0,8 МПа до 3,5 МПа. В процессе исследования было определено, что максимальная толщина стенки уплотнения не должна превышать $S_{max}=3,7$ мм, так как, дальнейшее увеличение толщины стенки, приведет к превышению допустимых напряжений на растяжение и снизит упругие свойства материала. Для удобства пользователя, в программной среде Visual Basic for Applications (VBA), был разработан калькулятор для быстрого проектирования геометрии поршневого манжетного уплотнения.

Ключевые слова: манжетное уплотнение, течение газа в зазоре, математическая модель, программный модуль Ansys, бессмазочный материал.

Объект исследования. Объектом исследования в данной работе является манжетное цилиндропоршневое уплотнение с рекомендованными толщинами стенок для различных диапазонов давления с фиксированной температурой в рабочей камере (50 °С). Номинальный внешний диаметр манжетного уплотнения – 20 мм, угол раскрытия – 115°, высота уплотнения – 5,5 мм, материал – Ф4К15М5.

Введение. Для сохранения регламентированных зазоров пар трения и обеспечения требуемой долговечности поршневого компрессорного агрегата необходимо качественно спроектировать конструкцию манжетного цилиндропоршневого уплотнения. Проведенный литературный обзор фундаментальных работ посвященных исследованиям в области цилиндропоршневых уплотнений [1–10] показал, что на данный момент, практически, отсутствуют рекомендации по проектированию конструкции L-образного манжетного цилиндропоршневого уплотнения. В предыдущей работе [11] было показано влияние угла раскрытия манжетного уплотнения на герметичность рабочей камеры поршневого компрессора. В данной работе, упор сделан на рекомендации по выбору толщины стенки манжетного уплотнения, с учетом ее износа в процессе работы, до необходимой наработки часов. Теоретические исследования проводились в программной среде ANSYS Workbench [12].

Постановка задачи. Для решения контактной задачи использовался метод *Normal Lagrange*

[12] для исключения возможности проникновения манжетного уплотнения в тело цилиндра, коэффициент трения задавался 0,2. Для увеличения области контакта задавался *Pinball region* с радиусом 1,5 мм. На рисунке 1 представлена сеточная модель расчетных элементов. Размер ячейки сетки с учетом производительности компьютера составлял 0,1 мм.

Минимально допустимая толщина стенки в зависимости от давления в рабочей камере оценивалась по допустимому напряжению, согласно условию [10]:

$$\sigma_{max} \leq (0,25 \div 0,3)HB, \quad (1)$$

где HB – твердость полимера.

Для материала Ф4К15М5, учитывая твердость [2] HB=40÷50, предельное напряжение составляло – 10÷15 МПа, принимая во внимания данные по разрушающему напряжению при растяжении [3] – 13–15 МПа, с учетом запаса, обусловим, что максимальное напряжение не должно превышать 13 МПа.

Максимально допустимая толщина стенки оценивалась по допустимым напряжениям изгиба. Согласно теории [5] увеличение радиальной толщины уплотнения, сопровождается ростом радиального давления от сил собственной упругости уплотнения. Увеличение радиального давления сопровождается ростом напряжений изгиба (растяжения внутренних волокон) при установке уплотнения в цилиндр и в рабочем состоянии. Максимально допустимое напряжение при изгибе для материала Ф4К15М5 составляет – 11 МПа [3].

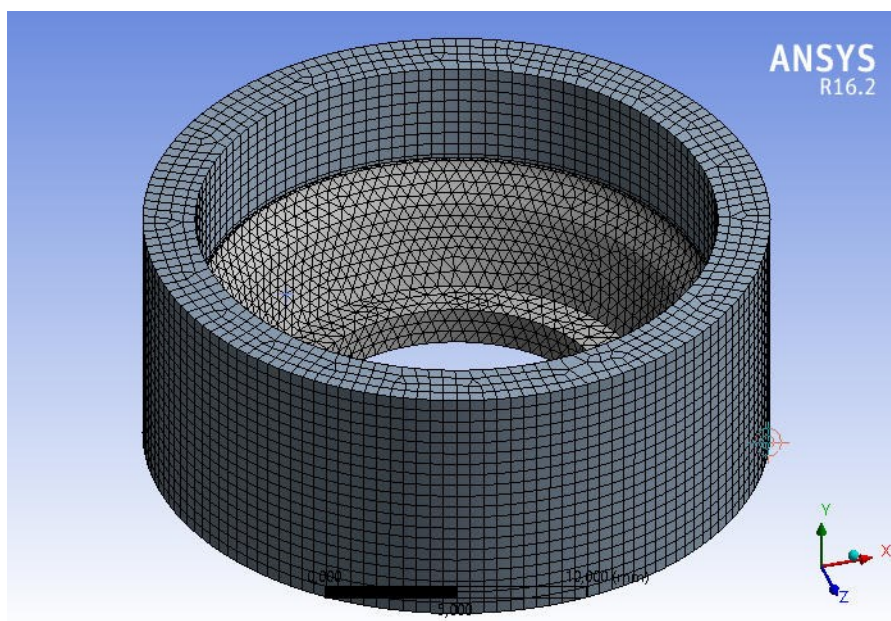


Рис. 1. Сеточная модель расчетных элементов

Граничные условия, действующие на манжетное уплотнение, заданы при условии постоянного давления в межкольцевом объеме равным P_1 , а также с учетом действия давления под ман-

жетным уплотнением $P_2 = P_1 \cdot 0,75$ [14], температура для каждого из расчетных режимов была постоянна – 55 °С. Граничные условия представлены на рисунке 2.

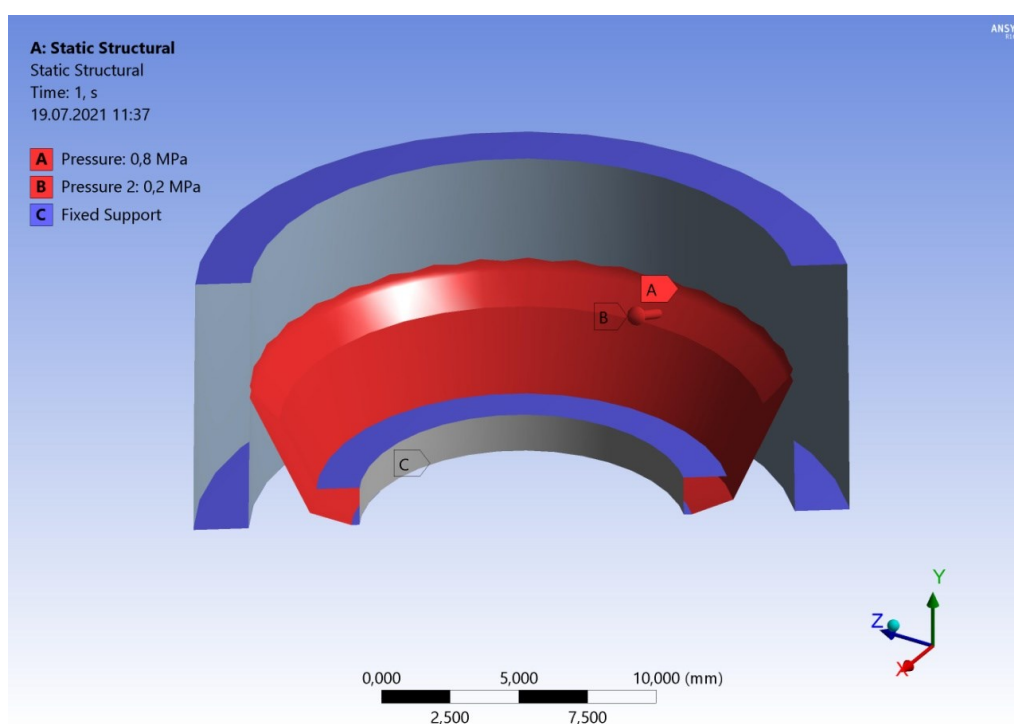


Рис. 2. Граничные условия

Минимальную толщину стенки в зависимости от максимального давления в рабочей камере выбирали из прочностного расчета по стандартной формуле [10], округляли до целого числа и проверяли допускаемые напряжения в ANSYS.

$$S_{min} = \frac{P_p D}{(2[\sigma] + P_p)} \quad (2)$$

где P_p – максимальное рабочее давление в цилиндре, МПа,

D – внутренний диаметр цилиндра, м,

$[\sigma]$ – допускаемые напряжения (из формулы 1), МПа.

Максимально допустимую толщину стенки выбирают таким образом, чтобы в рабочем состоянии (формула 3 для расчета наибольших напряжений растяжения, формула 4 для расчета наибольших напряжений сжатия) и при установке наборного поршня в цилиндр (формула 5) максимальные напряжения на изгиб не были превышены [5]. Максимальную толщину стенки дополнительно проверяли в ANSYS, моделируя процесс установки наборного поршня в цилиндр, с учетом среднего радиального давления действующего от экспандера:

$$\sigma'_p = 3q_y \left(\frac{D_{\text{ц}}}{S} - 1 \right)^2, \quad (3)$$

где q_y – удельное давление уплотнений на стенки цилиндра, кПа. По рекомендациям [5], при использовании уплотнений, выполненных на основе фторопласта, удельное давление должно

находиться в пределах $q_y = 15 - 20$ кПа; $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра, мм; S – толщина стенки уплотнения, мм.

$$\sigma''_p = \sigma'_p \left(\frac{D_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}} - 2S} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{yc}} \approx 2E \left(\frac{S}{D_{\text{ц}}} \right)^2 \frac{\alpha}{\alpha + 1}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала, МПа.

$$\alpha = \frac{\sigma_{\text{yc}}}{\sigma_p}, \quad (6)$$

где σ_p – допускаемые напряжение растяжения, МПа.

На рисунке 3 представлен результат по расчету предельных напряжений при давлении в рабочей камере $P_1=0,8$ МПа и толщины манжетного уплотнения $S=0,6$ мм, видно, что при заданной нагрузке максимальное напряжение составит 12,1 МПа, что лежит в допустимых пределах.

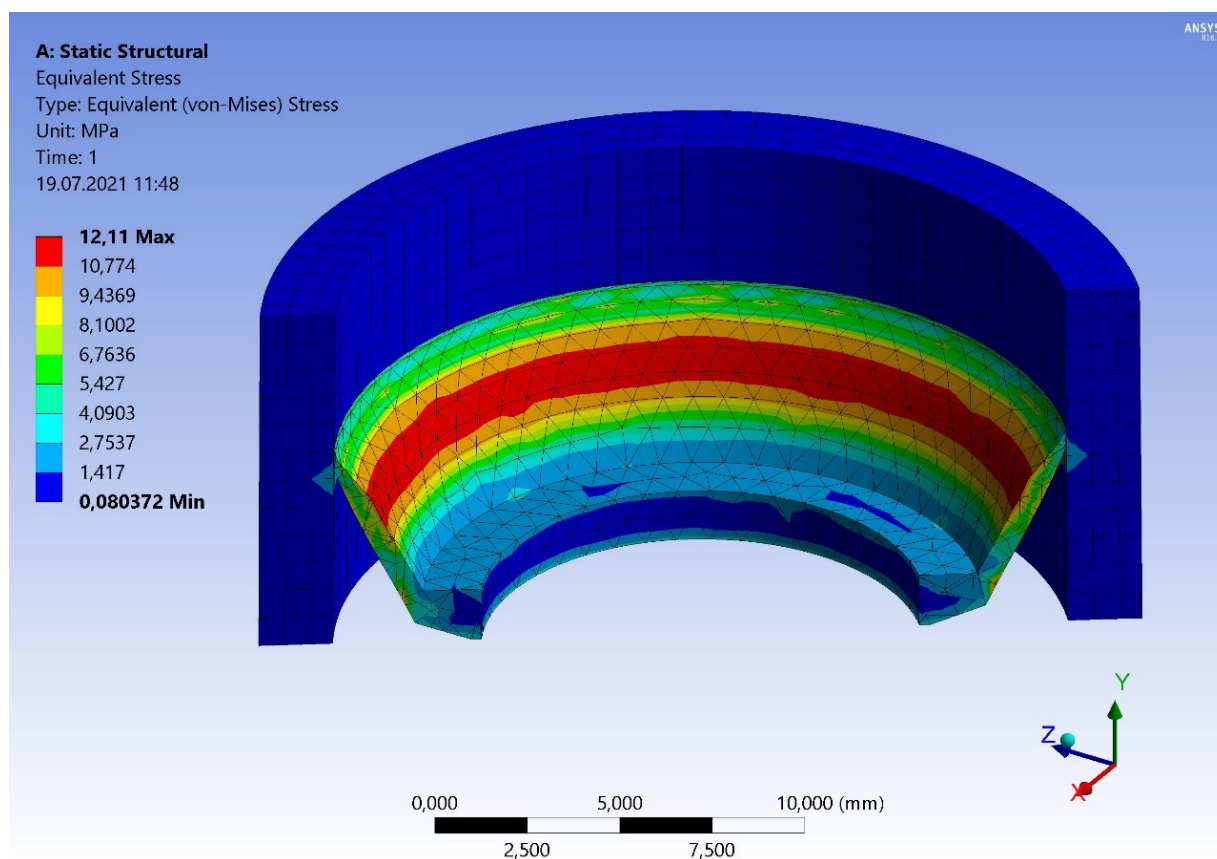


Рис. 3. Эпюра напряжений действующих на манжетное уплотнение при давлении в рабочей камере $P_1=0,8$ МПа, $S=0,6$ мм

На рисунке 5 представлен результат по расчету предельных напряжений при давлении в рабочей камере $P_1=0,9$ МПа и толщины манжетного уплотнения $S=0,6$ мм, видно, что при заданной нагрузке максимальное напряжение составит 13,4 МПа, что не укладывается в допустимые

пределы, соответственно, для давления 0,8 МПа минимальная толщина стенки составит 0,6 мм.

Максимальная толщина стенки (рассчитанная по формуле 3, составляет 3,2 мм), результаты, полученные в ANSYS представлены на рисунках 6а и 6б.

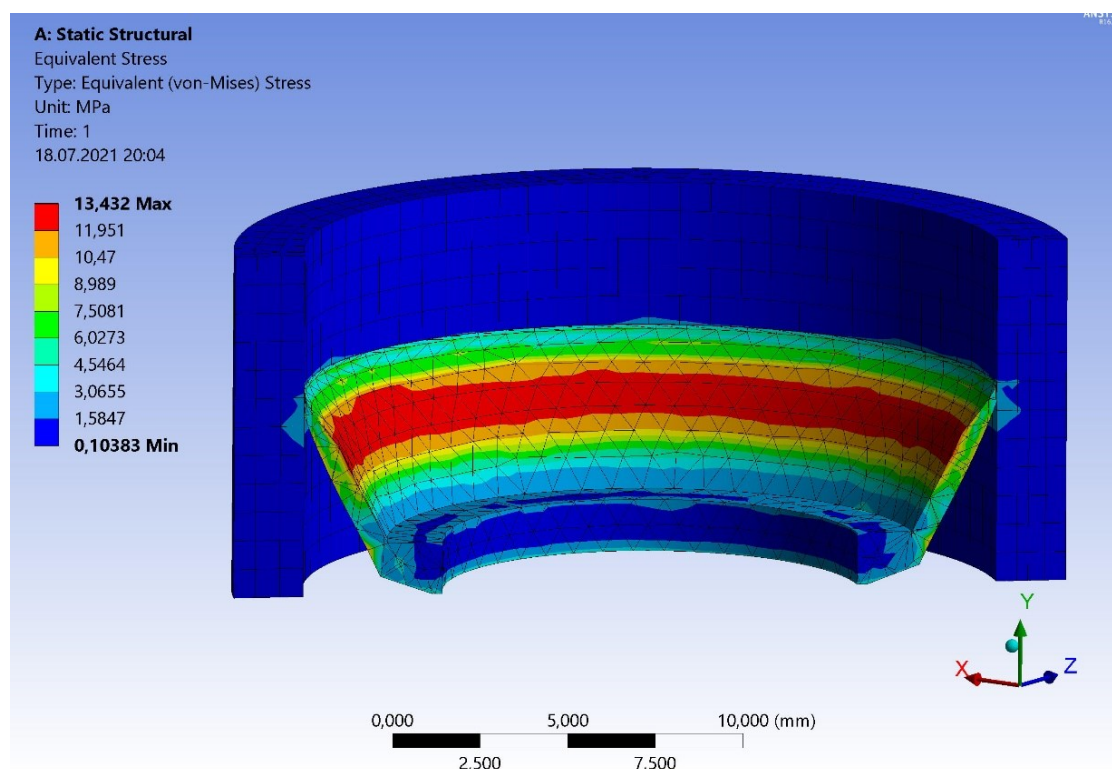


Рис. 4. Эпюра напряжений действующих на манжетное уплотнение при давлении в рабочей камере $P_1=0,9$ МПа, $S=0,6$ мм

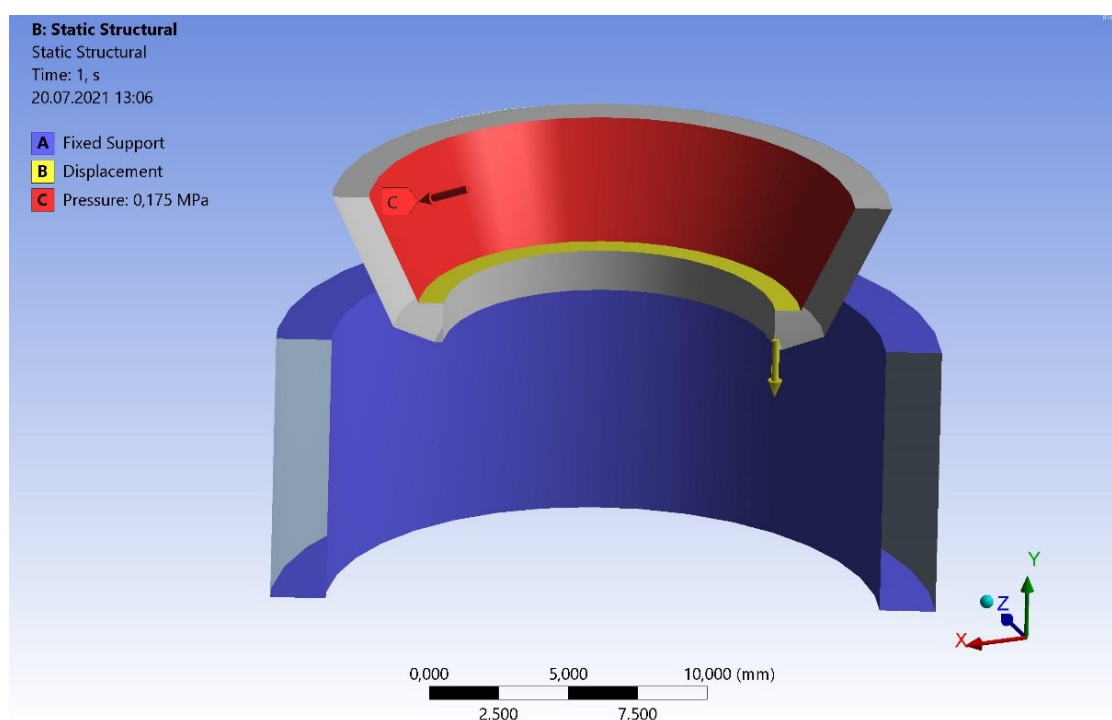


Рис. 5. Моделирование процесса установки манжетного уплотнения в цилиндр

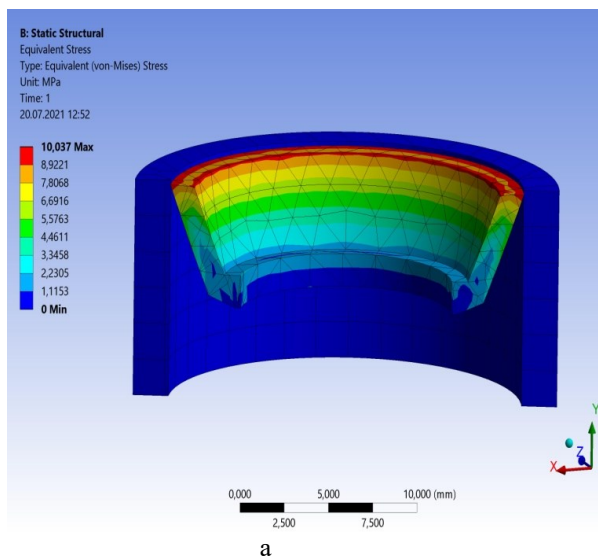
Согласно рис. 6а, мы видим, что при толщине стенки 3,2 мм допускаемые напряжения на изгиб лежат в допустимых пределах, при увеличении стенки до 3,5 мм, допускаемые напряжения на изгиб превышают допустимые, соответственно максимальная толщина стенки манжетного уплотнения для цилиндра с номинальным диаметром - 20 мм, составит 3,2 мм.

Зная максимальную и минимальную толщину стенки манжетного уплотнения, можно оценить ресурс его работы. Учитывая данные по радиальному износу поршневого кольца из материала Ф4К15М5 при условиях, описанных в работе [15], оценим теоретический ресурс работы уплотнения при наших условиях, для этого воспользуемся следующей формулой:

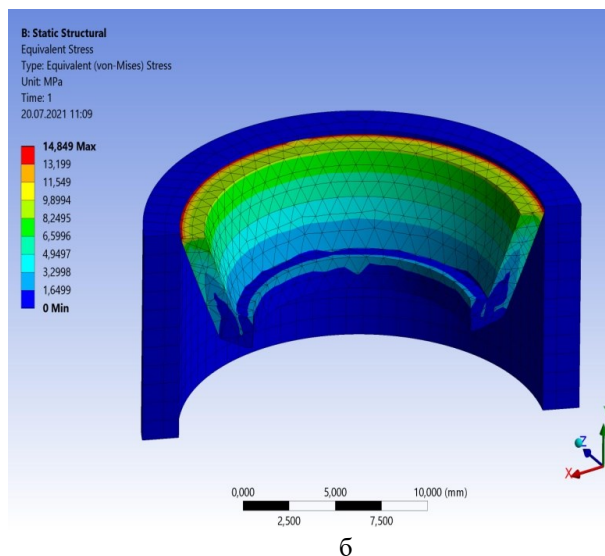
$$R_T = \frac{\Delta S}{\left(\frac{I_r P'}{P}\right)}, \quad (7)$$

где $\Delta S = S_{max} - S_{min}$, I_r – известный радиальный износ поршневого кольца (0,77 мм на 1000

тыс. час, при давлении $P' = 32$ МПа), P – давление в рабочей камере, МПа.



а



б

Рис. 6. Эпюра изгибающих напряжений действующих на манжетное уплотнение при:
а – толщина стенки 3,2 мм; б – толщина стенки 3,5 мм

Учитывая давление в рабочей камере 0,8 МПа, минимальную толщину стенки 0,6 мм, максимальную толщину стенки 3,7 мм, теоретический ресурс работы составит не менее 160 тыс. ч.

Аналогичным образом были рассчитаны толщина стенки и теоретический ресурс работы

уплотнения для различных давлений, действующих в рабочей камере поршневого компрессора диаметром 20 мм, результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

P_{max}	S_{min} , мм	S_{max} , мм	R, Тыс. час.
0,8	0,6	3,7	160
1,5	1,2		130
2	1,6		103
2,5	1,9		77
3	2,3		46
3,5	2,6		10

Анализируя полученные данные, видно, что максимально допустимое давления для материала Ф4К15М5 составляет 3,5 МПа, что полностью соответствует экспериментальным данным, описанным в работе [3].

Для удобства пользователя, в программной среде Visual Basic for Applications (VBA), был разработан калькулятор для быстрого проектирования геометрии поршневого манжетного уплотнения. Расчетная схема представлена на рисунке 7.

В диалоговом окне (рис. 8) необходимо задать основные параметры, выделенные черной рамкой (характеристики материала, рабочее давление, диаметр цилиндра), после чего произойдет расчет основных геометрических параметров манжетного цилиндропоршневого уплотнения (согласно расчетной схеме на рис. 7). При достижении пиковых напряжений изгиба, программа автоматически выдаст сообщение о том, что необходимо изменить рабочее давление или используемый материал, рис. 9.

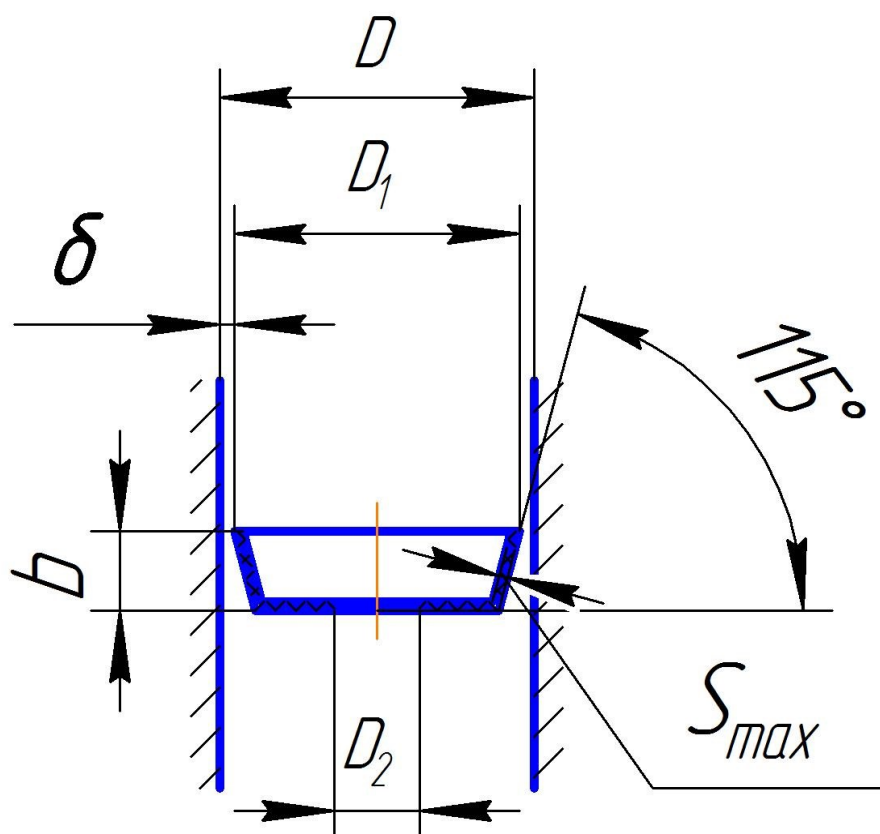


Рис. 7. Расчетная схема

Расчет манжеты

Допускаемые напряжения (растяжения), МПа	24,5	Допускаемые напряжения на изгиб, МПа	13,7
Максимальное рабочее давление, МПа	3,5	Модуль упругости (E), МПа	685
Удельное давление уплотнения МПа	0,018	Диаметр цилиндра (D), м	0,02

Минимальная толщина стенки (Smin), мм	1.3	Максимальная толщина стенки, (Smax), мм	3.3
Ширина уплотнения (b), мм	5	Отношение напряжений изгиба к растяжению, МПа	0.56
Напряжения растяжения в рабочем состоянии, МПа	11.17352662	Диаметр уплотнения (D1), мм	20.021
Напряжения сжатия в рабочем состоянии, МПа	5.74712643	Диаметр отверстия для посадки на шток (D2), мм	7
Напряжения изгиба при установке уплотнения в цилиндр, МПа	2.077833333	Теоретический зазор, мм	2

Теоретический ресурс работы, тыс. час

23.81

Расчет

Рис. 8. Диалоговое окно параметров

Рис. 9. Сообщение о корректировке

Выводы. В процессе исследования было выявлено, что для манжетного уплотнения L-образного сечения, в диапазоне давления от 0,8 МПа до 3,5 МПа максимальная толщина стенки не должна превышать $S_{\max}=3,7$ мм, дальнейшее увеличение толщины стенки приведет к превышению допускаемых напряжений на растяжение и снизит упругие свойства манжетного уплотнения. Рекомендуемые толщины стенок с теоретическим ресурсом работы, приведены в таблице 1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И. Расчет и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах. Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбАХИПТ, 1995. 194 с.
2. Новиков И.И., Захаренко В.П., Ландо Б. С. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах. Л.: Машиностроение, 1981. С. 238.
3. Захаренко В.П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. докт. тех. наук. Санкт-Петербург., 2001. 159 с.
4. Пинчук Л.С. Создание и исследование герметизирующих систем в машиностроении на основе термопластов: Автореф. канд. дис. Минск: Изд-во АН БССР, 1974. 20 с.
5. Френкель М.И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е издание, переработанное и дополненное. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.
6. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет /2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 456 с.
7. Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К., Пластинин П. И. Поршневые компрессоры; Под общ. ред. Б. С. Фотина. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.
8. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Баршадский Л.И. Надежность и долговечность машин. М.: "Машиностроение". 1975. 408 с.
9. Бусаров С.С., Бусаров И.С., Титов Т.С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.
10. Бусаров С.С., Бусаров И.С., Недовенчаный А.В., Кобыльский Р.Э., Сеницин Н.Г., Муслова Л.А., Гаглыева А.Е., Марченко М.Р. Анализ напряжено-деформированного состояния манжетного цилиндропоршневого уплотнения при различном угле раскрытия // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Выпуск 2. С. 599–606.
11. Madenci E., Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. Springer, Boston, MA: Springer International Publishing. 2015. 657 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-7550-8.
12. Мирзоев Р.Г., Кугушев И.Д., Брагинский В.А. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления. Учебное пособие для студентов вузов. Л., «Машиностроение». 1972. 416 с.

13. Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Кобыльский Р.Э., Синицин Н.Г., Муслова Л.А. Верификация нагрузки действующей на манжетное цилиндропоршневое уплотнение работающего без смазки // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Выпуск 10. С. 658–667.

Информация об авторах

Бусаров Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». E-mail: bss1980@mail.ru. Омский государственный технический университет. Россия, 644050, г. Омск, ул. Проспект Мира, д. 11.

Кобыльский Роман Эдуардович, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». E-mail: roman.kobilsky@gmail.com. Омский государственный технический университет. Россия, 644050, г. Омск, ул. Проспект Мира, д. 11.

Синицин Никита Глебович, студент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». E-mail: sinicin_00@mail.ru. Омский государственный технический университет. Россия, 644050, г. Омск, ул. Проспект Мира, д. 11.

Поступила 07.12.2021 г.

© Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Синицин Н.Г., 2022

Busarov S.S., *Kobylsky R.E., Sinitsin N.G.

Omsk State Technical University

*E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

THEORETICAL RECOMMENDATIONS FOR CHOOSING THE WALL THICKNESS OF A LIP SEAL OPERATING WITHOUT LUBRICATION

Abstract. As the literature review has shown, at this point in time, there are almost completely no recommendations for choosing the wall thickness of a cuff L-shaped seal operating mainly in dry friction conditions. The service life of the entire compressor unit will depend on the correct choice of the wall thickness of the seal. In this paper, recommendations for the design of a sleeve cylinder piston seal are considered. The basic calculation formulas for choosing the minimum wall thickness are presented, and the boundary conditions for choosing the maximum wall thickness are also presented. On the basis of ANSYS package programs, verification calculations of the calculated wall thicknesses were carried out at various pressures in the working chamber at an average temperature of plus 55 ° C. The pressure in the working chamber varied from 0.8 MPa to 3.5 MPa. In the course of the study, it was found that the maximum wall thickness of the seal should not exceed $S_{max} = 3.7$ mm, since a further increase in wall thickness will lead to an excess of permissible tensile stresses and reduce the elastic properties of the material. For the convenience of the user, in the Visual Basic for Applications (VBA) software environment, a calculator was developed for the rapid design of the geometry of the piston lip seal.

Keywords: lip seal, gas flow in the gap, mathematical model, Ansys software module, non-lubricate material.

REFERENCES

1. Prilutsky I.K., Prilutsky A.I. Calculation and design of reciprocating compressors and expanders on normalized bases [Raschet i proektirovanie porshnevnykh kompressorov i detanderov na normalizovannykh bazah. Uchebnoe posobie]. Study guide. Saint Petersburg: Spbot, 1995. 194 p. (rus)

2. Novikov I.I., Zakharenko V.P., Lando, B. S., piston seal lubricant-free compressors [Bessmazochnye porshnevye uplotneniya v kompressorah]. L.: Mashinostroenie, 1981. 238 p. (rus)

3. Zakharenko V.P., fundamentals of the theory of the creation of seals and reciprocating compressors without lubrication Diss. doctor. Tekh. Sciences [Osnovy teorii uplotnenij i sozdanie porshnevnykh kompressorov bez smazki: dis. dokt. tekhn. nauk]. St. Petersburg., 2001. 159 p. (rus)

4. Pinchuk L.S. Creation and research of sealing systems in mechanical engineering based on thermoplastics: Abstract. cand. dis. [Sozdanie i issledovanie germetiziruyushchih sistem v mashinostroyeniye na osnove termoplastov: Avtoref. kand. dis.]. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1974. 20 p. (rus)

5. Frenkel M.I. Piston compressors: theory, design and fundamentals of design – 3rd edition, revised and supplemented [Porshnevye kompressory: teoriya, konstrukcii i osnovy proektirovaniya. 3-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe]. L.: Mechanical Engineering, 1969. 744 p. (rus)

6. Plastinin P. I. Piston compressors. Volume 1. Theory and Calculation /2nd ed., reprint. and additional [Porshnevye kompressory. Tom 1. Teoriya i raschet. 2-e izd., pererab. i dop.]. M.: Kolos, 2000. 456 p. (rus)

7. Fotin B.S., Pirumov I.B., Prilutsky I.K., Plastinin P.I. Reciprocating compressors; Under the general editorship of B. S. Fotin [Porshnevye kompressory; Pod obshch. red. B. S. Fotina]. L.: Mechanical engineering. Leningr. ot-d-nie, 1987. 372 p.

8. Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Barshadsky L.I. Reliability and durability of machines [Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin]. M.: "Mechanical engineering". 1975. 408 p. (rus)

9. Busarov S.S., Busarov I.S., Titov T.S. Experimental determination of conditional clearances of cylinder piston seals of compressor units [Eksperimental'noe opredelenie uslovykh zazorov cilindroporshnevyyh uplotnenij kompressornykh agregatov]. Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation, rocket and power engineering. 2019. Vol. 3, No. 1. Pp. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-560. (rus)

10. Busarov S.S., Busarov I.S., Nedovenchany A.V., Kobylsky R.E., Sinitsin N.G., Muslova L.A., Gagloeva A.E., Marchenko M.R. Analysis of the stress-strain state of the cuff cylinder piston seal at different opening angles [Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya manzhetnogo cilindroporshnevo uplotneniya pri razlichnom ugle

raskrytiya]. Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2021. Issue 2. Pp. 599–606. (rus)

11. Madenci E., Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. Springer, Boston, MA: Springer International Publishing. 2015. 657 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-7550-8.

12. Mirzoev R.G., Kugushev I.D., Braginsky V.A. Fundamentals of design and calculation of plastic parts and technological equipment for their manufacture. Textbook for university students [Osnovy konstruirovaniya i rascheta detalej iz plastmass i tekhnologicheskoy osnastki dlya ih izgotovleniya. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov]. L., "Mechanical Engineering". 1972. 416 p. (rus)

13. Busarov S.S., Nedovenchany A.V., Kobylsky R.E., Sinitsin N.G., Muslova L.A. Verification of the load acting on the cuff cylinder piston seal operating without lubrication [Verifikaciya nagruzki dejstvuyushchej na manzhetnoe cilindroporshnevo uplotnenie rabotayushchego bez smazki]. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. Issue 10. Pp. 658–667. (rus)

14. Zakharenko A.V., Zakharenko V.P. On the calculation of loads in a multi-ring piston seal of compressors without high-pressure lubrication [O raschete nagruzok v mnogokol'cevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya]. Bulletin of MAX. 2012. No. 2. Pp. 29–32. (rus)

15. Kragelsky I.V. Friction and wear [Trenie i iznos]. M.: Mechanical Engineering. 1968. 480 p. (rus)

Information about the authors

Busarov, Sergey S. PhD, Associate Professor. E-mail: bssi1980@mail.ru. Omsk State Technical University. Russia, 644050, Omsk, Prospekt Mira str., 11.

Kobylsky, Roman E. Postgraduate student. E-mail: roman.kobylsky@gmail.com. Omsk State Technical University. Russia, 644050, Omsk, Prospekt Mira str., 11.

Sinitsin, Nikita G. Student. E-mail: sinicin_00@mail.ru. Omsk State Technical University. Russia, 644050, Omsk, Prospekt Mira str., 11.

Received 07.12 2021

Для цитирования:

Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Синицин Н.Г. Теоретические рекомендации по выбору толщины стенки манжетного уплотнения работающего без смазки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-103-111

For citation:

Busarov S.S., Kobylsky R.E., Sinitsin N.G. Theoretical recommendations for choosing the wall thickness of a lip seal operating without lubrication. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No.3. Pp. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-103-111