

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

3

2020

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, 2020 год

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Официальный сайт журнала: http://vestnik_rus.bstu.ru

Тел: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 44446.

Online подписка: <http://www.akc.ru/itm/255810462/>

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

- 05.23.01** – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 05.23.03** – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 05.23.05** – Building materials and products (technical sciences)
- 05.23.20** – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)

- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

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

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

Official website of the journal: http://vestnik_eng.bstu.ru
Tel.: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru
Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446.
Online subscription: <http://www.akc.ru/itm/2558104627/>

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).
Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ МГСУ (РФ, г. Москва).

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).

Большаков Андрей Геннадьевич, д-р арх., проф., зав. каф. архитектурного проектирования Иркутского национального исследовательского технического университета (РФ, г. Иркутск).

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., зав. каф. 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 МГСУ (РФ, г. Москва).

Гридин 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).

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).

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

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

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

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

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГ-НЕУПОР» (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 хозяйства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

Фишер Ханс-Бертрам, Dr.-Ing., заместитель заведующего кафедрой "Строительные материалы" Баухаус-Университет 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).

Шабовалов 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 (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).

Yuriy M. Bazhenov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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).

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

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).

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).

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).

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

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

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

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

Высоцкая М.А., Лашин М.В., Курлыкина А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУНТА С СОДЕРЖАНИЕМ РАКУШКИ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	8
Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н. ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА. СОСТАВЫ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ	16
Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ПРИСУТСТВИИ ТОПЛИВНЫХ ЗОЛ	26
Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ РУБАШКОЙ	34
Буланин В.А. ВЫБОР ТИПА ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ В РОССИИ	46
Плотников А.С. РАЗНОКОНТУРНАЯ УСТАНОВКА УЗЛОВ КРЫШНЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ	60
Маркушев С.О. ИЕРАРХИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ РАЗНОГО МАСШТАБА В СТРУКТУРЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА	68
Дубровина Н.П. ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ РОЛЬ ДВОРЦОВ КУЛЬТУРЫ ЛЕНИНГРАДА ПЕРВОЙ ТРЕТИ XX ВЕКА НА ПРИМЕРЕ ПЕТРОГРАДСКОГО И ВАСИЛЕОСТРОВСКОГО РАЙОНОВ	76
Аль-Шайбани А.А., Шило А.В. ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЖИЛОЙ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ В ИРАКЕ: ИССЛЕДОВАНИЯ И ЛИТЕРАТУРА	82
Зарубская Е.О. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕНТРОВ УЛИЧНОГО СПОРТА ДЛЯ УСЛОВИЙ ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА-ЮГРЫ	89

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПОЛИИМИДНЫХ ТРЕКОВЫХ (ЯДЕРНЫХ) МЕМБРАН	97
Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИОМИМЕТИЧЕСКОГО ГИДРОКСИАПАТИТА, ДОПИРОВАННОГО СИЛИКАТ- И КАРБОНАТ-АНИОНАМИ В ПРИСУТСТВИИ ЦИТРАТ-ИОНОВ	106

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Титов Д.П. РАБОТА РОТОРА В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ	114
Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. МЕХАНИКА ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ С ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ	121

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Vysotskaya M.A., Lashin M.V., Kyrlikina A.V. USE OF SHELL-CONTAINING SOIL IN TRANSPORT CONSTRUCTION	8
Antonenko M.V., Ogurtsova Yu.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. PHOTOCATALYTIC ACTIVE SELF-CLEANING CEMENT-BASED MATERIALS. COMPOSITIONS, PROPERTIES, APPLICATION	16
Markov A.Y., Bezrodnykh A.A., Markova I.Y., Strokova V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A. FORECASTING STRENGTH OF PORTLAND CEMENT IN THE PRESENCE OF FUEL ASHES	26
Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH STEEL FIBER JACKET	34
Bulanin V.A. CHOOSING THE TYPE OF GAS PISTON INSTALLATIONS FOR HEAT AND GAS SUPPLY IN RUSSIA	46
Plotnikov A.S. MULTI-CONTOURED INSTALLATION OF ROOF BOILER PLANTS NODES IN CIVIL BUILDINGS	60
Markushev S.O. HIERARCHY OF URBAN PLANNING COMPOSITIONS OF DIFFERENT SCALES IN THE STRUCTURE OF THE HISTORICAL CENTER OF ST. PETERSBURG	68
Dubrovina N.P. URBAN ROLE OF THE LENINGRAD PALACES OF CULTURE OF THE FIRST THIRD OF THE XX CENTURY ON THE EXAMPLE OF PETROGRADSKY AND VASILEOROVSKY DISTRICTS	76
Al-Shaibani A.A., Shilo A.V. PROBLEMS OF FORMATION RESIDENTIAL ARCHITECTURAL ENVIRONMENT IN IRAQ: RESEARCH AND LITERATURE	82
Zarubskaya E.O. HEORETICAL MODEL OF STREET SPORT OBJECTS IN KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG-YUGRA	89

CHEMICAL TECHNOLOGY

Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Manaev V.A., Samoilova E.S., Sidelnikov R.V. STUDY OF THE STRUCTURE AND OPTICAL DENSITY OF POLYIMIDE TRACK (NUCLEAR) MEMBRANE	97
Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V. SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF BIOMIMETIC HYDROXYAPATITES DOPED BY SILICATE AND CARBONATE ANIONS IN THE PRESENCE OF CITRATE IONS	106

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Titov D.P. ROTOR OPERATION IN THE VORTEX LAYER DEVICE	114
Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Y.G. MECHANICS OF THE SUSPENDED LAYER WITH POLYDISPERSE PARTICLES IN CONTINUOUS AIR MIXERS	121

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-8-15

Высоцкая М.А., *Лашин М.В., Курлыкина А.В.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУНТА С СОДЕРЖАНИЕМ РАКУШКИ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аннотация. В статье рассмотрена проблема применения грунтов, представленных песком со значительным содержанием ракушки в строительстве насыпей железных и автомобильных дорог. Обзор литературных источников по данной теме не дал никаких результатов, что вызвало интерес к вопросу о возможности использования данного грунта. Проведены исследования по определению основных физико-механических свойств песка-ракушечника. Получены данные, отображающие динамику изменения физико-механических свойств грунта в процессе уплотнения. Выявлена зависимость уменьшения частных остатков с 10 до 0,1 сита. Максимальное увеличение частного остатка происходит на сите 0,1. Очевидно, эти изменения являются следствием измельчения грунта под действием большой механической нагрузки и являются одним из факторов уменьшения фильтрации в данном грунте. Установлено, что значение коэффициента фильтрации при входном контроле составило – 2,58 м/сут., после уплотнения этого же грунта в теле насыпи коэффициент фильтрации упал до – 1,51 м/сут. Таким образом, наблюдается снижение коэффициента фильтрации после уплотнения грунта на 41,5 % в сравнении с входными испытаниями грунта. Обоснована необходимость дальнейших исследований для поиска технологических решений по применению такого грунта на объектах дорожного строительства.

Ключевые слова: грунт, ракушечник, физико-механические характеристики, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации.

Введение. Стабильность и долговечность земляного полотна автомобильных и железных дорог – основные факторы, определяющие надежность и работоспособность возводимой конструкции. Они напрямую зависят от основных физико-механических характеристик применяемого грунта: плотности, фильтрации и гранулометрического состава.

Действующие в нашей стране нормативы СП 46.13330.2012 «Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 "Мосты и трубы"» (далее – СП 46) и СП 78.13330.2012. «Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85. "Автомобильные дороги"» (далее – СП 78), предъявляют различные требования к плотности и степени уплотнения грунта. Требования зависят от дорожно-климатической зоны строительства и расположения слоя грунта по высоте насыпи¹.

Не зависимо от климатической зоны, особое внимание требуется уделять качеству уплотнения верхнего слоя земляного полотна, который находится под дорожной одеждой автомобильных дорог или балластной призмой железных дорог. Данный слой располагается в рабочей зоне и

воспринимает основные нагрузки от проезжающего транспорта.

Грунты, применяемые при отсыпке насыпи, предусматриваются проектом с уточнением коэффициентов уплотнения и фильтрации на объекте.

В соответствии с ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» в строительстве автомобильных и железных дорог предпочтительнее использовать песчаные грунты, в которых масса частиц размером 0,05–2 мм составляет более 50 % с числом пластичности $I_p < 1$ %. Классификация грунта по зерновому составу приведена в ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» в зависимости от крупности, определяемой ситовым методом. В соответствии с этой классификацией песок может быть: гравелистым, крупным, средним, мелким и пылеватым. Более того, при возведении насыпи над трубами, водопропускными сооружениями, отсыпки устоев мостов, в используемых грунтах коэффициент фильтрации должен быть не менее 2 м/сут, согласно СП 46.

¹Методические рекомендации по уточнению норм плотности грунтов насыпей автомобильных дорог в различных региональных условиях. Науч.-тех. сов. Минтрансстрой. Союздорнии. М., 1988. 7 с.

Таким образом, в зависимости от объекта строительства, возводимая насыпь должна соответствовать ряду требований:

- уплотнение не менее 0,98 от максимальной плотности применяемого грунта;
- грунт в теле насыпи быть однородным;
- коэффициент фильтрации не менее 0,5 м/сут. для насыпи автомобильных и железных дорог;
- коэффициент фильтрации не менее 2 м/сут. для участков насыпей за устоями мостов;
- положение земляного полотна в плане соответствовать проекту.

Однако, протяженность нашей страны значительна и, зачастую, каждый объект строительства характеризуется определенными особенностями обеспечения техническими средствами и применяемых материалов. Так, местные грунты могут характеризоваться недостаточными показателями для применения их в строительстве или не соответствовать требованиям проектной документации. Однако использование привозного

грунта связано с огромными финансовыми вложениями. В таких случаях, если производитель работ сможет доказать заказчику целесообразность использования местных грунтов без потери качества возводимого объекта, применение местных грунтов становится возможным. Это определяет интерес отрасли к укреплению и стабилизации грунтов [1–7].

Материалы и методы. В представленном исследовании рассматривается опыт возведения насыпи объекта дорожной инфраструктуры из грунта со значительным содержанием ракушки.

В процессе производства работ было выявлено значительное изменение показателей свойств грунта на стадии испытания и его укатки в насыпи. Стоит отметить, что содержание ракушки с размером больше 5 мм. в среднем составляет 5–10 % от общей массы партии грунта (рис. 1). Ракушки данной фракции в наибольшей степени подвержены измельчению, в следствии уплотнения катком, что влияет на стабильность и показатели свойств грунта: зернового состава и физико-механические свойства.



Рис. 1. Ракушка размером >5 мм

Анализ литературных и нормативных источников по тематике исследования показал отсутствие опыта применения данного грунта в дорожном строительстве. Это определило актуальность и необходимость дальнейших исследований на предмет возможности использования грунта с содержанием ракушки в транспортном строительстве.

В качестве примера, рассмотрим один объект дорожной инфраструктуры, возведенный из грунта со значительным содержанием ракушки рис. 2.

В соответствии с проектом, песок используют как дренирующий грунт. Грунт разрабатывается намывным способом и просеивается на грохоте с ситами 20 и 10 мм, для отделения органических примесей и крупных включений. На выходе получается песок, имеющий различную классификацию по зерновому составу, зависящую от разрабатываемого слоя. На основании представленных исследований, было установлено, что грунт обладает нестабильными свойствами, а именно: изменяется плотность и коэффициент фильтрации в результате уплотнения механизированным способом.

Данные исследования грунта-ракушечника показали, что при входном контроле основные

физико-механические значения характеризуются значениями, представленными в табл. 1.



Рис. 2. Общий вид грунта ракушечника

Данные таблицы 1 получены из серии образцов, отобранных с различных карт намыва в течение семи месяцев исследований. Как видно, колебания в показателях довольно существенны.

В связи с колебанием показателей и различием физико-механических свойств грунта из уплотненного слоя, относительно лабораторных

тестов, возникла целесообразность спрогнозировать возможные изменения в гранулометрическом составе и коэффициенте фильтрации устраиваемого слоя. Для этого, грунт, представленный ракушечником, был дополнительно проверен пробной укаткой, сопровождающейся характерными изменениями его показателей.

Таблица 1

Физико-механические показатели грунта ракушечника

Наименование показателей	Фактические значения
Максимальная плотность, г/см ³	$1,66 \pm 0,05$
Оптимальная влажность, %	$12,8 \pm 1,5$
Коэффициент фильтрации, м/сут.	$2,6 \pm 1,0$
Содержание частиц менее 0,10 мм, %	$3,0 \pm 2,0$

Для моделирования поведения грунта при уплотнении была разработана программа исследований, по которой испытания проводились при входном контроле, затем этот же грунт распределяли в один слой на подготовленной площадке и отбирали пробы после уплотнения катком до проектного значения 0,98 от максимальной плотности грунта. Дополнительно уплотнение грунта производили на приборе стандартного уплотнения.

Дальнейшие испытания выполнялись на 5 сериях образцов песка средней крупности. При входном контроле определялись основные физико-механические характеристики грунта, за основу были взяты усредненные показатели.

Определение гран состава грунта выполнялось согласно ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Ме-

тоды лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Грунт высушивали до постоянной массы, рассеивали при входном контроле, затем производили уплотнение на ПСУ и делали повторный рассев. Исследованию так же подвергались пробы, отобранные непосредственно из конструктивного слоя после уплотнения катком. В соответствии с ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности», при уплотнении грунта на ПСУ, предварительно отсеивали фракции больше 5 мм. Полученные данные были усреднены по каждому способу испытания, на их основе построен график, отображающий динамику изменения гран состава грунта (рис. 3).

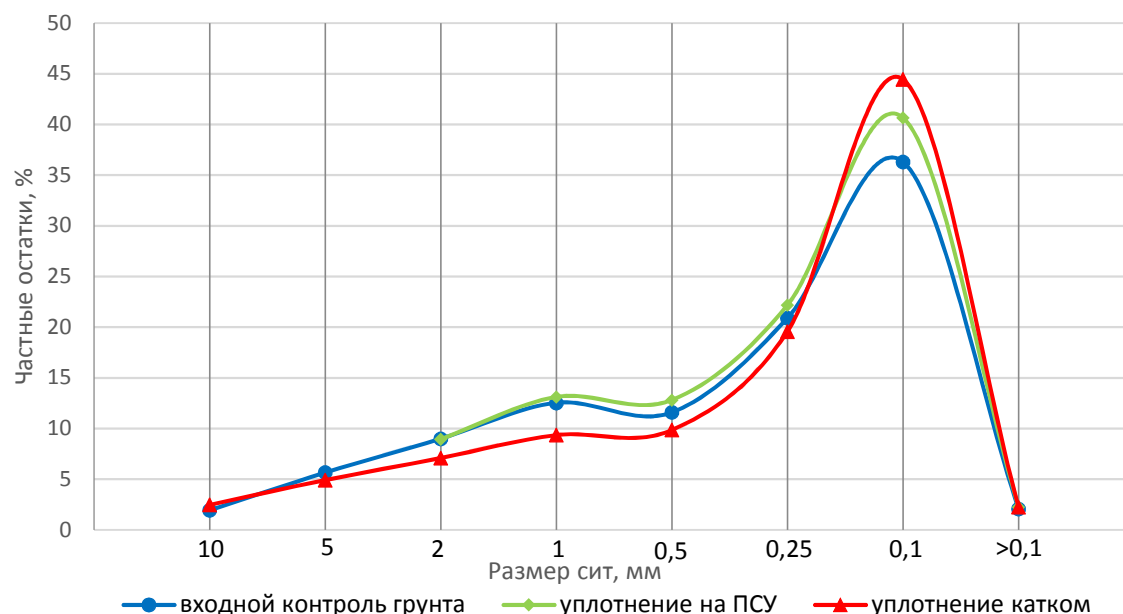


Рис. 3. Сравнение гранулометрического состава грунта после уплотнения

Наибольшие отклонения от показаний входного контроля характерны для проб после уплотнения катком. Как видно, в образцах грунта, после уплотнения катком, наблюдается уменьшение частных остатков с 10 до 0,1 сита. Максимальное увеличение частного остатка происходит на сите 0,1. Очевидно, эти изменения являются следствием измельчения грунта под действием большой механической нагрузки.

Так как максимальной плотности грунта и, особенно, песка можно добиться только при его

частичном увлажнении, важным физико-механическим показателем является значение оптимальной влажности. Определение оптимальной влажности и максимальной плотности производилось для каждой пробы грунта согласно ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности». По полученным усредненным результатам испытаний был построен график зависимости плотности от влажности грунта (рис. 4).

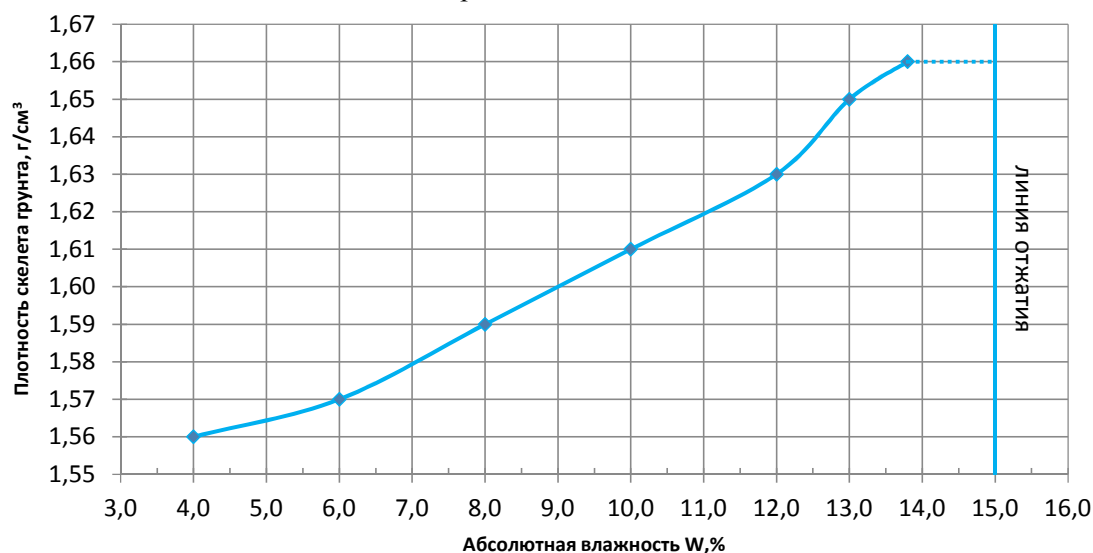


Рис. 4. График зависимости изменения значений плотности сухого грунта от влажности

Одним из важных факторов формирования плотности песчаных грунтов в естественных условиях является их влажность. Собственно, для песков, как утверждает многими исследователями, следует рассматривать общность плотность – влажность [8]. Плотность зависит от ми-

нерального состава и пористости. Чем выше содержание тяжелых минералов и ниже пористость, тем выше плотность [9].

В соответствии с ГОСТ 22733-2016 максимальная плотность – это наибольшая плотность сухого грунта, которая достигается при испытании грунта методом стандартного уплотнения, а

оптимальная влажность – это значение влажности грунта, соответствующее максимальной плотности сухого грунта. Однако, как видно из рисунка 4, плотность увеличивается в ходе проведения всего эксперимента, но значение явно выраженного максимума плотности отсутствует. При достижении влажности более 14 % определение плотности становится невозможным, по причине выдавливания переувлажнённого грунта из формы и отжатия воды. Поэтому, за максимальную плотность грунта принято значение, пред отжатием воды из формы и значение влажности, соответствующее ординате.

Таким образом, значение оптимальной влажности составило 13,8 %, а максимальной плотности 1,66 г/см³.

В связи с этим, следующим этапом в постановке эксперимента было определение коэффициента фильтрации.

Определение коэффициента фильтрации выполнялось согласно ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации». Значение показателей каждой пробы отличалось от других, это очевидно обусловлено наличием примесей и индивидуальными особенностями гранулометрического состава грунта.

Так, среднее значение коэффициента фильтрации составило: при входном контроле – 2,58 м/сут., после испытания на ПСУ – 1,84 м/сут., после уплотнения катком – 1,51 м/сут. Таким образом, при уплотнении грунта катком, динамика падения коэффициента фильтрации соответствующей динамике изменения гран состава песка – ракушечника.

Основная часть. Известно, что водопроницаемость грунта зависит от структуры зерен, их крупности и размера пор [10]. Логично предположить, что изменение коэффициента фильтрации может быть связано с измельчением частиц грунта и как следствие, уменьшением порового пространства в слое грунта.

Учитывая тот факт, что при среднем размере пор более 0,1 мм силы капиллярного поднятия практически сводятся к нулю, и вода в таких промежутках перемещается только под действием силы тяжести [11], особое внимание стоит уделять количеству грунта, оставшемуся на сите № 0,1 и прошедшему через сито № 0,1. Поэтому, в соответствии с СП 46, содержание частиц на сите <0,1 должно составлять не более 10 %, что соответствует нашему случаю.

Получив результаты исследований, возникает вопрос, от чего же зависит такое изменение гранулометрического состава грунта и падение коэффициента фильтрации?

Изменение гранулометрического состава, в первую очередь, является следствием механического воздействия катка, на слабые зерна ракушечника, которые измельчаются и забивают межпоровое пространство более крупных частиц [12]. Представленный грунт содержит ракушку, которую можно легко сломать руками. Можно представить, что происходит с такими зернами грунта под воздействием несколько тонного вибрационного катка.

Еще в 1937 г. проф. Охотин В.В. описал основные факторы, влияющие на коэффициент фильтрации. К главным из них, он относил размер пор, общую пористость и характер поверхности частиц [11].

Размер пор зависит от крупности частиц. Чем больше частицы, тем больше поровое пространство, которое они образуют между собой, тем свободнее и быстрее протекает фильтрация.

Для грунтов с неоднородным гранулометрическим составом ярко выражена фаза сжатия, называемая фазой сдвигов. На этом этапе в уплотненной структуре грунта происходит потеря устойчивости отдельных мелких частиц и их мгновенное перемещение в крупные поры, в результате чего структура грунта сильно изменяется. Если в гранулометрическом составе представлены частицы разных размеров, то поры между наиболее крупными из них могут быть заполнены более мелкими [13]. Известно, что при уплотнении слоя грунта применяют полив водой, которая может выступать в роли смачивателя и помогать более мелким частицам перемещаться и заклинивать более крупные.

Так как количество мелких частиц в грунте увеличивается, в процессе укатки происходит эффект заклинивания, в результате которого наблюдается падение коэффициента фильтрации. Необходимо понимать, что нагрузка на автомобильную или железную дорогу постоянная, а информация, до какой степени способны измельчаться частицы грунта, представленные ракушкой, отсутствует. Можно предположить, что со временем эта система будет становиться только плотнее, со специфическим понижением коэффициента фильтрации.

Стоит так же отметить химический состав данного грунта. Если, в природе, песок представлен в основном минералами кварца (SiO₂) [14], то ракушка преимущественно состоит из известняка (CaCO₃). Находясь в достаточно мелком состоянии, при наличии водной среды и спрессовывающей нагрузки в течение продолжительного времени, структура может стать монолитной.

Выводы

1. Установлена зависимость изменения физико-механических характеристик в процессе уплотнения.

2. Проведены исследования по сравнению основных физико-механических свойств до и после уплотнения грунта в насыпи, демонстрирующие уменьшение коэффициента фильтрации в теле насыпи на 41,5 %, и увеличение дисперсности грунта в следствие механического воздействия.

3. Возможности использования данного грунта только при отсыпке насыпей для автомобильных и железных дорог (K_f грунта – ракушечника более 0,5 м/сут).

4. Важно выявить соотношение песка и ракушки в грунте и понять, при каких условиях среды и нагрузки возможно омоноличивание конструкции.

5. Актуальным направлением исследований является разработка эффективных технологий, позволяющих использовать грунт – ракушечник в конструктивных слоях транспортных сооружений без ограничений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов Н.В., Расинэ Ж. Обзор современных методов усиления и стабилизации слабых оснований // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 499–513.
2. Раковски З., Кузнецова А.В. Механическая стабилизация конструктивных слоев в транспортном строительстве на набухающих и пучинистых грунтах // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. XIII междунар. научно-техн. конф., Москва, 31 марта – 01 апр., 2016 г. М.: МИИТ, 2016. С. 27-32.
3. Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Пинт Э.М., Еличев К.А. Стабилизация грунта неорганическими вяжущими // Интернет-журнал «Наукоедение». 2014. № 6. <http://naukovedenie.ru/PDF/44TVN614.pdf>
4. Горьков В.А., Коришко А.Н., Набоков А.В., Крижановская Т.В., Огороднова Ю.В. Стабилизация грунтов методом «Холодного ре-сайклинга» в условиях многолетнемерзлых грунтов для обустройства нефтегазовых месторождений // Фундаментальные исследования. 2017. № 7. С. 20–24.
5. Золотых С.Н. Стабилизация глинистых грунтов в транспортном строительстве // Образование, наука, производство. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. С. 600–603.
6. Chijioke C.I., Donald C.N. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. No. 11. Pp. 423-440.
7. Zaid H.M.A. Review of Stabilization of Soils by using Nanomaterials // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2013. No. 7. Pp. 576–581.
8. Дудлер И.В. Значение понятия «плотность - влажность» для изучения и оценки физико механических свойств песчаных грунтов // Вопросы инженерной геологии. М.: МИСИ, 1977. 7 с.
9. Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов: учебное пособие. М.: КДУ. 2008. 542 с.
10. Беховых Л.А., Макарычев С.В., Шорина И.В. Основы гидрофизики: учебное пособие. Барнаул. 2008. С. 150–160.
11. Охотин В.В. Физические и механические свойства грунтов. М.: 1937. 120 с.
12. Мирный А.Ю., Гайков Е.А., Зубов А.О. Зависимость сжимаемости несвязных грунтов от степени однородности гранулометрического состава // Вестник МГСУ. Т. 26, № 1. С. 12–18.
13. Потапов А.Д., Платонов Н.А., Лебедева М.Д., Песчаные грунты. М.: 2009. 256 с.
14. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. Учебное пособие. 2-е издание. М.: Высш. шк., 1986. 239 с.

Информация об авторах

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильные и железные дороги. E-mail: goruri@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лашин Максим Викторович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Курлыкина Анастасия Владимировна, магистрант кафедры автомобильные и железные дороги. E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2020 г.

© Высоцкая М.А., Лашин М.В., Курлыкина А.Д., 2020

Vysotskaya M.A., *Lashin M.V., Kyrlikina A.V.
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
 *E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru

USE OF SHELL-CONTAINING SOIL IN TRANSPORT CONSTRUCTION

Abstract. The article deals with the problem of using soils represented by sand with a significant content of shell in the construction of embankments of railways and highways. The review of literature sources on this topic did not yield any results, which aroused interest in the possibility of using this soil. Research has been carried out to determine the main physical and mechanical properties of shell sand. Data showing the dynamics of changes in the physical and mechanical properties of the soil during compaction are obtained. The dependence of the reduction of partial residues from 10 to 0.1 sieves is revealed. The maximum increase in the partial remainder occurs on the screen 0,1. Obviously, these changes are the result of grinding the soil under the influence of a large mechanical load and are one of the factors reducing filtration in this soil. It is found that the value of the filtration coefficient at the input control is 2.58 m/day., after compaction of the same soil in the body of the embankment, the filtration coefficient fell to 1.51 m/day. Thus, there is a decrease in the filtration coefficient after compaction of the soil by 41.5% in comparison with the input tests of the soil. The need for further research to find technological solutions for the use of such soil on road construction sites is justified.

Keywords: soil, shell rock, physical and mechanical characteristics, particle size distribution, filtration coefficient.

REFERENCES

1. Romanov N.V., Rasine Zh. Review of modern methods of strengthening and stabilization of weak bases [Obzor sovremennih metodov ysileniya I stabilizatsii slabih osnovanii]. Bulletin of MGSU. 2018. Vol. 13. No. 4 (115). Pp. 449–513. (rus)
2. Rakovski Z., Kyznetsova A.V. Mechanical stabilization of structural layers in transport construction on swelling and heaving soils [Mekhanicheskaya stabilizatsiya konstruktivnykh sloev v transportnom stroitelstve na nabyhayschih i puchinyh gryntah]. Modern problems of design, construction and operation of the railway. XIII international scientific and technical conference. Moscow. March 31 - April 01. 2016. Moscow. MIIT. 2016. Pp. 27–32. (rus)
3. Romanenko I.I., Romanenko M.I., Petrovina I.N., Pint E. M., Elichev K.A. Soil stabilization with inorganic binders [Stabilizatsiya grynta neorganicheskimi vyazyshimi]. Internet journal "Science of Science". 2014. No. 6. (rus) <http://naukovedenie.ru/PDF/44TVN614.pdf>
4. Gor'kov V.A., Korishko A.N., Nabokov A.V., Krizhanivskaya T.V. Ogorodnova YU.V. Stabilization of soils by the method of "cold recycling" in the conditions of permafrost soils for the development of oil and gas fields [Stabilizatsiya gruntov metodom «Holodnogo resajklinga» v usloviyah mnogoletnemerzlykh gruntov dlya obustrojstva neftegazovykh mestorozhdenij]. Basic research. 2017. No. 7. Pp. 20–24. (rus)
5. Zolotih S.N. Clay soil stabilization in transport construction [Stabilizatsiya glinistyykh gruntov v transportnom stroitel'stve]. BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. Pp. 600–603. (rus)
6. Chijioke C.I., Donald C.N. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. No. 11. Pp. 423–440.
7. Zaid H.M.A. Review of Stabilization of Soils by using Nanomaterials. Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2013. No. 7. Pp. 576–581.
8. Dudler I.V. The meaning of the concept «density – humidity» for the study and assessment of the physico-mechanical properties of sandy soils [Znachenie ponyatiya «plotnost' - vlazhnost'» dlya izucheniya i ocenki fiziko mekhanicheskikh svoystv peschanykh gruntov]. Questions of engineering geology. Moscow. IISI. 1977. 7 p. (rus)
9. Dmitriev V.V., YArg L.A. Methods and quality of laboratory studies of soils: a training manual [Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov: uchebnoe posobie]. Moscow. KDU. 2008. 542 P. (rus)
10. Bekhoviyh L.A., Makarychev S.V., Shorina I.V. Fundamentals of hydrophysics: a training manual [Osnovy gidrofiziki: uchebnoe posobie]. Barnaul. 2008. Pp. 150–160. (rus)
11. Ohotin V.V. Physical and mechanical properties of soils [Fizicheskie i mekhanicheskie svoystva gruntov]. Moscow. 1937. 120 p. (rus)
12. Mirnyj A.Yu., Gajkov E.A., Zubov A.O. The dependence of the compressibility of incoherent soils on the degree of uniformity of particle size distribution [Zavisimost' szhimaemosti nesvyaznykh gruntov ot stepeni odnorodnosti granulometricheskogo sostava]. Vestnik MGSU. Vol. 26, No. 1. Pp. 12–18. (rus)
13. Potapov A.D., Platonov N.A., Lebedeva M.D. Sandy soil [Peschanye grunty]. Moscow. 2009. 256 p. (rus)

14. Babkov V.F., Bezruk V.M. Fundamentals of soil science and soil mechanics. Tutorial. 2nd edition [Osnovy gruntovedeniya i mekhaniki gruntov.

Uchebnoe posobie. 2-e izdanie]. Moscow Higher school. 1986. 239 p. (rus)

Information about the authors

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

Lashin, Maxim V. Postgraduate student. E-mail: Nedostypnbli@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kyrlikina, Anastasiya V. Master student. E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2020

Для цитирования:

Высоцкая М.А., Лашин М.В., Курлыкина А.Д. Использование грунта с содержанием ракушки в транспортном строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-8-15

For citation:

Vysotskaya M.A., Lashin M.V., Kyrlikina A.V. Use of shell-containing soil in transport construction. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-8-15

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25

Антоненко М.В., *Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА. СОСТАВЫ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация. В работе проведен обзор существующих технологий получения фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента, в том числе бетонов и сухих строительных смесей. Рассмотрены используемые фотокаталитические добавки, особенности их влияния на цементную систему. Приведены применяемые методы оценки фотокаталитической активности самоочищающихся цементных материалов. Проанализированы составы бетонных смесей и их свойства, а также области и перспективы применения. Обозначены основные проблемы разработки, производства и применения фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента. Основные направления работы в данной области для повышения способности к самоочищению фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента заключаются в: оптимизации микроструктуры фотокатализатора и композита с его использованием в направлении создания развитой поверхности фотокатализатора – иерархичной микроструктуры, что интенсифицирует диффузионные процессы реагентов фотокаталитических реакций и увеличивает площадь контакта фотокатализатора с загрязнителем, а также поглощает и аккумулирует волны ультрафиолетового излучения; оптимизации фазового состава диоксида титана – поиск соотношения анатазной и рутильной фазы, при котором достигается максимальная фотокаталитическая активность; выбор экономически целесообразного метода периодического обновления поверхности бетонных изделий, карбонизированных в процессе эксплуатации, с целью восстановления способности к самоочищению.

Ключевые слова: диоксид титана, фотокатализ, самоочищение, цемент, бетон, технология

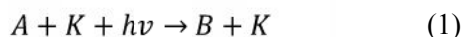
Введение. Цементные материалы, в частности бетоны, являются самыми распространенными материалами в строительстве, а их производство наиболее крупнотоннажным в своей отрасли. Приоритетным направлением в строительной индустрии является создание строительных композитов с новыми свойствами [1–4]. В связи с этим, применение бетонных изделий в качестве носителей фотокатализаторов, с целью снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере является целесообразным и обоснованным. Дополнительным положительным эффектом является достижение «самоочищения» поверхности изделий с фотокатализаторами, что позволяет сохранять исходные чистоту и цвет конструкций длительное время в условиях высокозагрязненной городской среды и инфраструктуры. Способность поверхности строительных материалов к самоочищению позволяет увеличить период между работами по очистке фасадов, что сокращает затраты на обслуживание зданий и сооружений [5].

Из всех существующих фотокатализаторов самое широкое применение на данный момент нашел нано- и микроразмерный TiO_2 анатазной модификации. Несмотря на относительно высокое значение ширины запрещенной зоны, равной 3,2 эВ, по сравнению с другими известными полупроводниками, например, SiC – 3,0 эВ, WO_3 – 2,6 эВ, Fe_2O_3 – 2,1 эВ, CdS – 2,25 эВ, CdSe – 1,7

эВ, GaP – 2,25 эВ, GaAs – 1,4 эВ, TiO_2 характеризуется стабильностью и особым строением зонной структуры, обуславливающей его высокую фотокаталитическую активность [6, 7]. Помимо отдельных соединений известно также применение систем, например, InP-CdS , ZnTe-CdS , либо допирование TiO_2 атомами углерода, азота или серы [8–10]. Известно получение фотокаталитических композиционных материалов путем осаждения частиц TiO_2 на инертные носители. В качестве инертных подложек используют диоксид кремния, активированный углерод, морденит, цеолит [11–14]. За счет увеличения активной поверхности и равномерного распределению TiO_2 на поверхности адсорбентов, скорость самоочищения увеличивается.

Фотокаталитическое окислительно-восстановительное действие TiO_2 позволяет снижать количество загрязняющих веществ, таких как, оксиды азота (NO_x), летучие органические соединения (ЛОС) и оксиды серы (SO_x), как на поверхности материалов, так и в воздухе. Кроме того, эффект фотокаталитического самоочищения распространяется на многие другие органические материалы и живые организмы: органическая почва, жир, масло, плесень, водоросли, бактерии и др. Основными продуктами фотокатализа являются кислород, диоксид углерода, вода, сульфаты, нитраты и нитриты [15–17].

Реакция на поверхности твердых частиц катализатора возникает благодаря поглощению квантов света, вызывающих физические процессы разложения органических соединений [18, 19].



где A – исходные реагенты, B – продукты реакции, K – катализатор, $h\nu$ – энергия фотона падающего на поверхность фотокатализатора.

Несмотря на то, что исследование фотокатализаторов и их применения началось в 1972 году [20], на данный момент в области строительного материаловедения остается значительное количество вопросов, связанных с повышением «производительности» фотокаталитических реакций в среде цементных материалов и повышения их долговечности.

Основная часть. На территории РФ специальные свойства фотокаталитических бетонов согласно ГОСТ 57255-2016 «Бетоны фотокаталитически активные самоочищающиеся. Технические условия» характеризуются следующими показателями:

- способность к самоочищению, определяемая изменением краевого угла смачивания под воздействием ультрафиолетового излучения после предварительного «загрязнения» поверхности олеиновой кислотой;
- разложение (минерализация) загрязнителей воздуха: оксидов азота и летучих органических веществ.

Стоит отметить, что данный нормативный документ базируется на ряде международных стандартов (ISO 22197-1:2007, ISO 22197-3:2011, ISO 27448:2009), в связи с чем, вышеуказанные методы оценки фотокаталитических бетонов применяются исследователями многих стран.

Широко также распространен метод исследования способности к самоочищению материала, основанный на оценке разложения органического пигмента (родамин Б) на его поверхности под воздействием ультрафиолетового излучения, нормированный итальянским национальным стандартом UNI 11259 «Определение фотокаталитической активности гидравлических вяжущих – родамин тест».

Технологии получения фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента можно разделить на три основные группы.

1. Нанесение покрытий, содержащих фотокатализатор, на поверхность готовых бетонных изделий [21];

2. Введение фотокатализатора в объем бетонных изделий в процессе производства [22, 23];

3. Создание двухслойных бетонных изделий, состоящих из основного слоя и поверхностного слоя с фотокатализатором [24, 25].

Для реализации первого способа известно применение покрытий, полученных смешением пористых микросфер TiO_2 , белого портландцемента и воды в соотношениях: вода/цемент (B/C)=0,6, TiO_2 /цемент=0,3. Пористые микросферы TiO_2 имели размер порядка 500 нм, помимо анатазной модификации TiO_2 содержали 9,1 % рутила. Нанесение покрытия на подложку осуществлялось «ножевым» методом (doctor blade method) [26]. Толщина создаваемого покрытия около 77 мкм. По сравнению с чистым цементным данное фотокаталитическое покрытие обеспечило эффективное разложение олеиновой кислоты, резазурина и ацетальдегида [27].

Свою эффективность в качестве покрытий доказали системы типа «ядро – оболочка» состава $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$. Преимущество использования SiO_2 в данных системах заключается в его высоком химическом сродстве с продуктами гидратации цемента, а, следовательно, обеспечивает образование химических связей в результате пуццолановой реакции и улучшение адгезии. Порошок состава $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ в количестве 0,025 мг растворяли в 2 мл воды и распыляли на цементные и цементно-песчаные пластинки площадью 16 см². Размер ядра SiO_2 составлял 95 нм, толщина оболочки TiO_2 – 25 нм. TiO_2 представлен только анатазной модификацией. Высокая фотокаталитическая активность данных покрытий, равная фотокаталитической активности промышленного фотокатализатора AEROXIDE® TiO_2 P 25, подтверждена обесцвечиванием поверхности в результате деградации родамина Б [28].

При использовании второго метода технология получения самоочищающихся бетонов не требует дополнительного оборудования и не отличается от обычной технологии производства бетонов [29, 30]. Главная задача, которую необходимо решить при производстве, это равномерное распределение частиц фотокатализатора в объеме бетона. Проблема равномерного распределения возникает из-за высокой удельной поверхности фотокатализатора: от 50 [31] до 300 м²/г [11]. Как говорилось выше, решением данной проблемы является нанесение частиц диоксида титана на кремнеземный носитель методом осаждения [12–14].

При получении бетонной смеси фотокатализатор вводят перед добавлением воды затворения в сухую смесь или готовят суспензию фотокатализатора, например, в растворе воды и этанола,

что, однако, может замедлить процесс гидратации цемента. После набора прочности бетона TiO_2 присутствует во всей его структуре, он не вступает в реакцию с клинкерными минералами и продуктами гидратации цемента, так как является стабильным и высоко инертным материалом [12, 13, 17, 32, 33].

При третьем способе верхний слой панелей толщиной 5 мм был приготовлен из смеси цемента, песка, воды и TiO_2 (83,4 % анатаза, частицы размером 1 мкм) при соотношениях 1:2,75:0,484:0,05, соответственно. Эффективность очищения воздуха от NO_x составила 31,3 %, однако за 4 месяца в результате процессов выветривания и карбонизации образцы потеряли 80,4 % своей фотокаталитической активности [34].

Влияние TiO_2 на свойства цементного камня и бетона зависит от его дозировки [32, 35–41]. Так с увеличением дозировки TiO_2 от 5 до 10 % от массы цемента отмечается увеличение теплоты и скорости гидратации цемента. Доказано, что диоксид титана влияет на гидратацию цемента путем ускорения гетерогенного зародышеобразования [37, 38, 42–43]. Это подтверждается также сокращением сроков начала и конца схватывания [39].

Помимо ускоряющего действия TiO_2 на гидратацию силикатов кальция, доказано ускорение образования гидросиликатов кальция и уменьшение содержания портландита. Структура цементного камня, модифицированного нанодисперсным диоксидом титана, характеризуется присутствием на его поверхности пластинок титаната кальция, а также наличием в микропорах более развитых игольчатых кристаллов гидросиликатов кальция и волокон тоберморитового геля, которые способствуют снижению дефектности структуры, повышению плотности и прочности цементного камня [32].

Исследование влияния диспергирования ультразвуком в водно-спиртовой среде диоксида титана на структуру цементного камня в суточном возрасте показало интенсификацию гетерогенного зародышеобразования этрингита и портландита за счет образования отрицательно заряженных наноструктурированных частиц [36].

TiO_2 может выступать как инертный наполнитель, заполняя пустоты между частицами цемента, что приводит к увеличению прочности изделия и снижению водопоглощения за счет уплотнения структуры. Исследовалось влияние 0,5–2 % наноразмерного TiO_2 на прочность цементного камня на 28 суток твердения. Выявлено, что введение добавки приводит к увеличению прочности на сжатие и изгиб цементного камня, а оптимальная дозировка составляет 1 %

[40]. Введение TiO_2 в количестве 5 % оказала негативное влияние, привела к уменьшению прочности на изгиб [41].

Среди примеров натуральных исследований фотокаталитических цементных материалов выделяются: искусственно созданные узкие улицы во Франции, стены которых обшивались фотокаталитическими панелями, что позволило снизить концентрацию NO_x на 36,7–82 % по сравнению с улицами без фотокаталитических панелей [44], бетонные блоки дорожных покрытий в Бельгии, Нидерландах и США за 1 год обеспечили снижение концентрации NO_x на 20 %, 38 % и 85 % соответственно [45–47].

На территории РФ, на настоящий момент отсутствует опыт применения фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента. Однако их внедрение является перспективным для таких направлений как: производство отделочных смесей и сборных элементов, бетонных панелей, элементов дорожных и мостовых конструкций, покрытия дорог.

Заключение. Таким образом, можно выделить следующие основные проблемы разработки, производства и применения фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента:

- сложность равномерного распределения нано- и микроразмерных фотокатализаторов при их малых дозировках (до 5 %) в объеме сухих компонентов бетонной смеси;
- снижение физико-механических характеристик бетонных изделий при высоких дозировках фотокатализатора в их составе (свыше 5 %);
- снижение эффективности фотокатализа при смешивании фотокатализатора с компонентами бетона вследствие уменьшения количества поглощаемого света (ингибирование транспорта фотонов) и свободной поверхности (ингибирование диффузии реагентов) для протекания фотокаталитических реакций;
- недолговечность фотокаталитических покрытий в результате их слабой адгезии к подложке;
- потеря фотокаталитического эффекта в короткие сроки в результате карбонизации поверхности цементного материала. При этом присутствие TiO_2 ускоряет карбонизацию в результате повышенной концентрации CO_2 вблизи фотокаталитически активной поверхности.

Основные направления работы в данной области для повышения способности к самоочищению фотокаталитически активных самоочищающихся материалов на основе цемента:

- оптимизация микроструктуры фотокатализатора и композита с его использованием в

направлении создания развитой поверхности фотокатализатора (в том числе развитой пористости по объему) – иерархичной микроструктуры, что интенсифицирует диффузионные процессы реагентов фотокаталитических реакций и увеличивает площадь контакта фотокатализатора с загрязнителем, а также поглощает и аккумулирует (задерживает в объеме фотокатализатора на более долгое время) волны ультрафиолетового излучения;

– оптимизация фазового состава диоксида титана – поиск соотношения анатазной и рутильной фазы, при котором достигается максимальная фотокаталитическая активность;

– выбор экономически целесообразного метода периодического обновления поверхности бетонных изделий, карбонизированных в процессе эксплуатации, с целью восстановления способности к самоочищению.

Сравнивая методы получения фотокаталитических самоочищающихся бетонов можно говорить о том, что нанесение фотокаталитических покрытий актуально для уже готовых сооружений, в случае же строительства новых объектов наиболее целесообразно объемное ведение фотокатализаторов в поверхностный слой изделий. Данный способ обеспечивает долговечность фотокаталитического эффекта.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00263).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Vodopyanov I.O. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560 (1). Article № 012156.
2. Fediuk R.S., Svintsov A.P., Lesovik V.S., Pak A.A., Timokhin R.A. Designing of special concretes for machine building // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050 (1). Article № 012026.
3. Klyuev S., Klyuev A., Vatin N. Fine-grained concrete with combined reinforcement by different types of fibers // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. Article № 03006.
4. Botsman L.N., Strokovaya V.V., Ogurtsova Y.N. Properties of energy effective concrete based on artificial granulated aggregate // Materials Science Forum. 2018. Vol. 945. Pp. 244–249.
5. Janus M., Zajac K. Concretes with Photocatalytic Activity, High Performance Concrete Technology and Applications // Salih Yilmaz and Hayri Baytan Ozmen, IntechOpen. 2016. Available from: <https://www.intechopen.com/books/high-performance-concrete-technology-and-applications/concretes-with-photocatalytic-activity>
6. Gratzel M. Photoelectrochemical cells // Nature. 2001. Vol. 414. Pp. 338–344.
7. MacPhee D. E., Folli A. Photocatalytic Concretes - The interface between photocatalysis and cement chemistry // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 85. Pp. 48–54.
8. Кировская И.А., Тимошенко О.Т., Карпова Е.О. Каталитические и фотокаталитические свойства компонентов систем InP-CdS, ZnTe-CdS // Журнал физической химии. 2011. Т. 85. № 4. С. 633–636.
9. Zhang J., Liu Z. Fabrication and characterization of Eu^{2+} -doped lanthanum-magnesium-gallium / TiO_2 -based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation // Ceramics International. 2019. Vol. 45 (8). Pp. 10342–10347.
10. Perez-Nicolas M., Navarro-Blasco I., Fernandez J.M., Alvarez J.I. Atmospheric NO_x removal: study of cement mortars with iron- and vanadium-doped TiO_2 as visible light-sensitive photocatalysts // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. Pp. 257–271.
11. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Новые высокоэффективные нанодобавки для фотокаталитических бетонов: синтез и исследование // Нанотехнологии в строительстве. 2015. Том 7, № 1. С. 18–28.
12. Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Лабузова М.В. Сравнительная оценка активности кремнеземного сырья и фотокаталитического композиционного материала на его основе // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 25–30.
13. Губарева Е.Н., Баскаков П.С., Строкова В.В., Лабузова М.В. Особенности структуры золь диоксида титана и морфологии пленок на их основе // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 48 (74). С. 78–83.
14. Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе // Строительные материалы. 2019. № 5. С. 16–21.
15. Chen J., Poon C. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Pp. 1899–1906.
16. Хела Р., Боднарлова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа – TiO_2 в бетоне // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 77–81.

17. Faraldos M., Kropp R., Anderson M.A., Sobolev K. Photocatalytic hydrophobic concrete coatings to combat air pollution // *Catalysis Today*. 2015. Vol. 259. Pp. 228–236.
18. Лукутцова Н.П., Постникова О.А., Соболева Г.Н., Ротарь Д.В., Оглоблина Е.В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 5–8.
19. Лукутцова Н.П., Постникова О.А., Пыкин А.А., Ласман И.А., Солодухина М.Ю., Бондаренко Е.А., Сулейманова Л.А. Эффективность применения нанодисперсного диоксида титана в фотокатализе // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 3. С. 54–57.
20. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode // *Nature*. 1972. Vol. 238. Pp. 37–38.
21. Chen M, Chu J.W. NO_x photocatalytic degradation on active concrete road surface-from experiment to real-scale application // *Journal of Cleaner Production*. 2011. Vol. 19. Pp. 1266–1272.
22. Aissa A.H., Puzenat E., Plassais A., Herrmann J.M., Haehnel C., Guillard C. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal // *Applied Catalysis B: Environment*. 2011. Vol. 107 (1–2). Pp. 1–8.
23. Diamanti M.V., Lollini F., Pedferri M.P., Bertolini L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete // *Building and Environment*. 2013. Vol. 62. Pp. 174–181.
24. Fiore A., Marano G.C., Monaco P., Morbi A. Preliminary experimental study on the effects of surface-applied photocatalytic products on the durability of reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 137–143.
25. Тимохин Д. К., Геранина Ю.С. Диоксид титана как фотокатализатор в цементном бетоне // *Научное обозрение*. 2015. № 8. С. 46–50.
26. Wong Y.Q., Meng H.F., Wong H.Y., Tan C.S., Wu C.Y., Tsai P.T., Zan H.W. Efficient semi-transparent organic solar cells with good color perception and good color rendering by blade coating // *Organic Electronics: physics, materials, applications*. 2017. Vol. 43. Pp. 196–206.
27. Yang J., Wang G., Wang D., Liu C., Zhang Z. A self-cleaning coating material of TiO₂ porous microspheres/cement composite with high-efficient photocatalytic depollution performance // *Materials Letters*. 2017. Vol. 200. Pp. 1–5.
28. Wang D., Hou P., Zhang L., Xie N., Yang P., Cheng X. Photocatalytic activities and chemically-bonded mechanism of SiO₂@TiO₂ nanocomposites coated cement-based materials // *Materials Research Bulletin*. 2018. Vol. 102. Pp. 262–268.
29. Boonen E., Akylas V., Barmpas F., Boreave A., Bottalico L., Cazaunau M., Chen H., Daele V., De Marco T., Doussin J.F., Gaimoz C., Gallus M., George C., Grand N., Grosselin B., Guerrini G.L., Herrmann H., Ifang S., Kleffmann J., Kurtenbach R., Maille M., Manganelli G., Mellouki A., Miet K., Mothes F., Moussiopoulos N., Poulain L., Rabe R., Zapf P., Beeldens A. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels, Part I: Construction of the field site // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 155. Pp. 136–144.
30. Gallus M., Akylas V., Barmpas F., Beeldens A., Boonen E., Boreave A., Cazaunau M., Chen H., Daele V., Doussin J.F., Dupart Y., Gaimoz C., George C., Grosselin B., Herrmann H., Ifang S., Kurtenbach R., Maille M., Mellouki A., Miet K., Mothes F., Moussiopoulos N., Poulain L., Rabe R., Zapf P., Kleffmann J. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels, Part II: NO_x abatement results // *Building and Environment*. 2015. Vol. 84. Pp. 125–133.
31. Степанов А.Ю., Сотникова Л.В., Владимиров А.А., Дягилев Д.В., Ларичев Т.А., Пугачев В.М., Титов Ф.В. Синтез и исследование фотокаталитических свойств материалов на основе TiO₂ // *Вестник КемГУ*. 2013. № 2 (54). С. 249–255.
32. Тюкавкина В.В., Цырятьева А.В. Структура цементного камня, модифицированного нанодисперсной титаносодержащей добавкой // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 597–601.
33. Слесарев М.Ю., Попов К.В. Исследование эффективности применения фотокаталитических бетонов в городском строительстве // *Современное строительство и архитектура*. 2017. № 3 (07). С. 18–20.
34. Bogutyn S., Arboleda C., Bordelon A., Tikalsky P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO₂ material // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 96. Pp. 96–101.
35. Khataee R., Heydari V., Moradkhannejhad L., Safarpour M., Joo S.W. Self-cleaning and mechanical properties of modified white cement with nanostructured TiO₂. // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2013. Vol. 13. Pp. 5109–5114.
36. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Постникова О.А., Головин С.Н., Боровик Е.Г. Структура цементного камня с диспергированным диоксидом титана в суточном возрасте // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 13–17.
37. Jayapalan A.R., Lee B.Y., Kurtis K.E. Effect of Nano-sized Titanium Dioxide on Early Age Hydration of Portland Cement // In: Bittnar Z., Bartos P.J.M., Nemecek J., Smilauer V., Zeman J., editors. *Nanotechnology in construction: proceedings of the*

NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic. 2009. Pp. 267–273.

38. Lee B.Y., Kurtis K.E. Influence of TiO₂ Nanoparticles on Early C₃S Hydration // Journal of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93. Pp. 3399–3405.

39. Lee B.Y. Effect of titanium dioxide nanoparticles on early age and long term properties of cementitious materials // PhD thesis, School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, August 2012. 227 p.

40. Li H., Zhang M., Ou J. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement // International Journal of Fatigue. 2007. Vol. 29. Pp. 1292–1301.

41. Zhang M., Li H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Pp. 608–616.

42. Rashad A.M. A synopsis about the effect of nano-titanium dioxide on some properties of cementitious materials – A short guide for civil engineer // Reviews on Advanced Materials Science. 2015. Vol. 40. Pp. 72–88.

43. Lackhoff M., Prieto X., Nestle N., Dehn F., Niessner R. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement-influence of semiconductor type and cement ageing // Applied Catalysis B: Environmental. 2003. Vol. 10. Pp. 205–216.

44. Maggos T., Plassais A., Bartzis J.G., Vasilakos C., Moussiopoulos N., Bonafous L. Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. Vol. 136. Pp. 35–44.

45. Beeldens A. Environmental Friendly concrete pavement blocks: air purification in the centre of Antwerp // 8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6–8, 2006 San Francisco, California USA. 2006. Pp. 277–284.

46. Ballari M.M., Brouwers H.J.H. Full scale demonstration of air-purifying pavement // Journal of Hazardous Materials. 2013. Vol. 254–255. Pp. 406–414.

47. Cackler T., Alleman J., Kevern J., Sikkema J. Technology Demonstrations Project: Environmental Impact Benefits With “TX Active” Concrete Pavement in Missouri DOT Two-Lift Highway Construction Demonstration // Final Report I, Iowa State University. 2012. 119 p.

Информация об авторах

Антоненко Марина Вячеславовна, инженер-исследователь НИИ «Наносистемы в строительном материаловедении». E-mail: labuzova326@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор, директор Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра Наноструктурированных композиционных материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Губарева Екатерина Николаевна, инженер кафедры Материаловедения и технологии материалов. E-mail: ekaterina.bondareva@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2019 г.

© Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н., 2020

Antonenko M.V., *Ogurtsova Yu.N., Strokov V.V., Gubareva E.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru*

PHOTOCATALYTIC ACTIVE SELF-CLEANING CEMENT-BASED MATERIALS. COMPOSITIONS, PROPERTIES, APPLICATION

Abstract. *The paper reviews the available technologies for producing photocatalytic active self-cleaning materials based on cement, including concretes and dry building mixtures. Used photocatalytic additives and their influence on the cement system are considered. The applied methods for assessing the photocatalytic activity of self-cleaning cement materials are presented. The compositions of concrete mixtures, their properties, areas and prospects of application are analyzed. The main problems of development, production and application of photocatalytic active self-cleaning materials based on cement are presented. The main directions to increase the self-cleaning ability of photocatalytic active materials based on cement are: optimization of the microstructure of the photocatalyst and the composite with its use in the direction of creating a developed surface of the photocatalyst – hierarchical microstructure; it intensifies the diffusion processes of photocatalytic reaction reagents and increases the contact area photocatalyst with a pollutant; it absorbs and accumulates ultraviolet radiation waves; optimization of the phase composition of titanium dioxide - search for the ratio of the anatase and rutile phases, at which the maximum photocatalytic activity is achieved; choosing of economically feasible method for periodical updating of the surface of concrete products carbonized during operation in order to restore self-cleaning ability.*

Keywords: *titanium dioxide, photocatalysis, self-cleaning, cement, concrete, technology.*

REFERENCES

1. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Vodopyanov I.O. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560 (1). Article No. 012156.
2. Fediuk R.S., Svintsov A.P., Lesovik V.S., Pak A.A., Timokhin R.A. Designing of special concretes for machine building. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050 (1). Article No. 012026.
3. Klyuev S., Klyuev A., Vatin N. Fine-grained concrete with combined reinforcement by different types of fibers. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. Article No. 03006.
4. Botsman L.N., Strokov V.V., Ogurtsova Y.N. Properties of energy effective concrete based on artificial granulated aggregate. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945. Pp. 244–249.
5. Janus M., Zajac K. Concretes with Photocatalytic Activity, High Performance Concrete Technology and Applications. Salih Yilmaz and Hayri Baytan Ozmen, IntechOpen. 2016. Available from: <https://www.intechopen.com/books/high-performance-concrete-technology-and-applications/concretes-with-photocatalytic-activity>
6. Gratzel M. Photoelectrochemical cells. Nature. 2001. Vol. 414. Pp. 338–344
7. MacPhee D. E., Folli A. Photocatalytic Concretes - The interface between photocatalysis and cement chemistry. Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 85. Pp. 48–54.
8. Kirovskaya I.A., Timoshenko O.T., Karpova E.O. The catalytic and photocatalytic properties of InP-CdS and ZnTe-CdS system components [Kataliticheskie i fotokataliticheskie svojstva komponentov sistem InP-CdS, ZnTe-CdS]. Russian Journal of Physical Chemistry A. 2011. Vol. 85. No. 4. Pp. 633–636. (rus)
9. Zhang J., Liu Z. Fabrication and characterization of Eu²⁺-doped lanthanum-magnesium-gallium /TiO₂-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation. Ceramics International. 2019. Vol. 45 (8). Pp. 10342–10347.
10. Perez-Nicolas M., Navarro-Blasco I., Fernandez J.M., Alvarez J.I. Atmospheric NO_x removal: study of cement mortars with iron- and vanadium-doped TiO₂ as visible light-sensitive photocatalysts. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. Pp. 257–271.
11. Falikman V.R., Vainer A.Ya. New high performance nanoadditives for photocatalytic concrete: synthesis and study [Novye vysokoeffektivnye nanodobavki dlya fotokataliticheskikh betonov: sintez i issledovanie]. Nanotechnologies in construction. 2015. Vol. 7. No. 1. Pp. 18–28. (rus)
12. Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokov V.V., Labuzova M.V. Comparative evaluation of the activity of silica raw materials and photocatalytic composite material based on them [Sravnitel'naya ocenka aktivnosti kremnezemnogo syr'ya i fotokataliticheskogo kompozitsionnogo materiala na ego osnove]. Obogashchenie Rud. 2019. No. 6. Pp. 25–30. (rus)
13. Gubareva E.N., Baskakov P.S., Strokov V.V., Labuzova M.V. Features of the structure of sols of titanium dioxide and morphology of the films based on them [Osobennosti struktury zolej dioksida

titana i morfologii plenok na ih osnove]. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2019. No. 48 (74). Pp. 78–83. (rus)

14. Labuzova M.V., Gubareva E.N., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V. The Use of the Photocatalytic Composite Material in the Cement System [Ispol'zovanie fotokataliticheskogo kompozitsionnogo materiala v cementnoy sisteme]. Stroitel'nye materialy (Construction materials). 2019. No. 5. Pp. 16–21. (rus)

15. Chen J., Poon C. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. Building and Environment. 2009. Vol. 44. Pp. 1899–1906.

16. Hela R., Bodnarova L. Research of Possibilities of Testing Effectiveness of Photoactive TiO_2 in Concrete [Issledovanie vozmozhnosti testirovaniya effektivnosti fotokataliza – TiO_2 v betone]. Stroitel'nye materialy (Construction materials). 2015. No. 2. Pp. 77–81. (rus)

17. Faraldos M., Kropp R., Anderson M.A., Sobolev K. Photocatalytic hydrophobic concrete coatings to combat air pollution. Catalysis Today. 2015. Vol. 259. Pp. 228–236.

18. Lukutsova N.P., Postnikova O.A., Soboleva G.N., Rotar D.V., Ogloblina E.V. Photo-Catalytic Pavement on the Basis of Additive of Nano-Disperse Titanium Dioxide [Fotokataliticheskoe pokrytie na osnove dobavki nanodispersnogo dioksida titana]. Stroitel'nye materialy (Construction materials). 2015. No. 11. Pp. 5–8. (rus)

19. Lukutsova N.P., Postnikova O.A., Pykin A.A., Lasman I.A., Soloduhina M.Yu., Bondarenko E.A., Suleymanova L.A. Efficiency of Use of Nano-disperse Powder of Dioxide of the Titan in the Photocatalysis [Effektivnost' primeneniya nanodispersnogo dioksida titana v fotokatalize]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 3. Pp. 54–57. (rus)

20. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. Nature. 1972. Vol. 238. Pp. 37–38.

21. Chen M., Chu J.W. NO_x photocatalytic degradation on active concrete road surface—from experiment to real-scale application. Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19. Pp. 1266–1272.

22. Aissa A.H., Puzenat E., Plassais A., Herrmann J.M., Haehnel C., Guillard C. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO_2 . Case study of formaldehyde removal. Applied Catalysis B: Environment. 2011. Vol. 107 (1–2). Pp. 1–8.

23. Diamanti M.V., Lollini F., Peddeferri M.P., Bertolini L. Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete.

Building and Environment. 2013. Vol. 62. Pp. 174–181.

24. Fiore A., Marano G.C., Monaco P., Morbi A. Preliminary experimental study on the effects of surface-applied photocatalytic products on the durability of reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. Pp. 137–143.

25. Timokhin D.K., Geranina Yu.S. Titanium Dioxide as a Photocatalyst in Cement Concrete [Dioksid titana kak fotokatalizator v cementnom betone]. Scientific Review. 2015. No. 8. Pp. 46–50. (rus)

26. Wong Y.Q., Meng H.F., Wong H.Y., Tan C.S., Wu C.Y., Tsai P.T., Zan H.W. Efficient semi-transparent organic solar cells with good color perception and good color rendering by blade coating. Organic Electronics: physics, materials, applications. 2017. Vol. 43. Pp. 196–206.

27. Yang J., Wang G., Wang D., Liu C., Zhang Z. A self-cleaning coating material of TiO_2 porous microspheres/cement composite with high-efficient photocatalytic depollution performance. Materials Letters. 2017. Vol. 200. Pp. 1–5.

28. Wang D., Hou P., Zhang L., Xie N., Yang P., Cheng X. Photocatalytic activities and chemically-bonded mechanism of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nanocomposites coated cement-based materials. Materials Research Bulletin. 2018. Vol. 102. Pp. 262–268.

29. Boonen E., Akylas V., Barmpas F., Boreave A., Bottalico L., Cazaunau M., Chen H., Daele V., De Marco T., Doussin J.F., Gaimoz C., Gallus M., George C., Grand N., Grosselin B., Guerrini G.L., Herrmann H., Ifang S., Kleffmann J., Kurtenbach R., Maille M., Manganelli G., Mellouki A., Miet K., Mothes F., Moussiopoulos N., Poulain L., Rabe R., Zapf P., Beeldens A. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels, Part I: Construction of the field site. Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 155. Pp. 136–144.

30. Gallus M., Akylas V., Barmpas F., Beeldens A., Boonen E., Boreave A., Cazaunau M., Chen H., Daele V., Doussin J.F., Dupart Y., Gaimoz C., George C., Grosselin B., Herrmann H., Ifang S., Kurtenbach R., Maille M., Mellouki A., Miet K., Mothes F., Moussiopoulos N., Poulain L., Rabe R., Zapf P., Kleffmann J. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels, Part II: NO_x abatement results. Building and Environment. 2015. Vol. 84. Pp. 125–133.

31. Stepanov A.Y., Sotnikova L.V., Vladimirov A.A., Dyagilev D.V., Larichev T.A., Pugachev V.M., Titov F.V. Synthesis and Research of Photocatalytic Properties of TiO_2 -based Materials [Sintez i issledovanie fotokataliticheskikh svoystv materialov na osnove TiO_2]. Bulletin of Kemerovo State University. 2013. No. 2 (54). Pp. 249–255. (rus)

32. Tyukavkina V.V., Tsyryatyeva A.V. The structure of the cement stone modified by nanodispersed titanium-bearing additive [Struktura cementnogo kamnya, modifitsirovannogo nanodispersnoj titanosoderzhashchej dobavkoj]. Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2019. No. 16. Pp. 597–601. (rus)
33. Slesarev M.Y., Popov K.V. Study of efficiency of photo-catalytic concrete application in urban construction [Issledovanie effektivnosti primeniya fotokataliticheskikh betonov v gorodskom stroitel'stve]. Modern construction and architecture. 2017. No. 3 (07). Pp. 18–20. (rus)
34. Bogutyn S., Arboleda C., Bordelon A., Tikalsky P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO₂ material. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. Pp. 96–101.
35. Khataee R., Heydari V., Moradkhannejhad L., Safarpour M., Joo S.W. Self-cleaning and mechanical properties of modified white cement with nanostructured TiO₂. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2013. Vol. 13. Pp. 5109–5114.
36. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Postnikova O.A., Golovin S.N., Borovik E.G. The structure of cement stone with dispersed titanium dioxide in daily age [Struktura cementnogo kamnya s dispergirovannym dioksidom titana v sutochnom vozraste]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 13–17. (rus)
37. Jayapalan A.R., Lee B.Y., Kurtis K.E. Effect of Nano-sized Titanium Dioxide on Early Age Hydration of Portland Cement. In: Bittnar Z., Bartos P.J.M., Nemecek J., Smilauer V., Zeman J., editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic. 2009. Pp. 267–273.
38. Lee B.Y., Kurtis K.E. Influence of TiO₂ Nanoparticles on Early C₃S Hydration. Journal of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93. Pp. 3399–3405.
39. Lee B.Y. Effect of titanium dioxide nanoparticles on early age and long term properties of cementitious materials. PhD thesis, School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, August 2012. 227 p.
40. Li H., Zhang M., Ou J. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. International Journal of Fatigue. 2007. Vol. 29. Pp. 1292–1301.
41. Zhang M., Li H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Pp. 608–616.
42. Rashad A.M. A synopsis about the effect of nano-titanium dioxide on some properties of cementitious materials – A short guide for civil engineer. Reviews on Advanced Materials Science. 2015. Vol. 40. Pp. 72–88.
43. Lackhoff M., Prieto X., Nestle N., Dehn F., Niessner R. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement-influence of semiconductor type and cement ageing. Applied Catalysis B: Environmental. 2003. Vol. 10. Pp. 205–216.
44. Maggos T., Plassais A., Bartzis J.G., Vasilakos C., Moussiopoulos N., Bonafous L. Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels. Environmental Monitoring and Assessment. 2008. Vol. 136. Pp. 35–44.
45. Beeldens A. Environmental Friendly concrete pavement blocks: air purification in the centre of Antwerp. 8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6–8, 2006 San Francisco, California USA. 2006. Pp. 277–284.
46. Ballari M.M., Brouwers H.J.H. Full scale demonstration of air-purifying pavement. Journal of Hazardous Materials. 2013. Vol. 254–255. Pp. 406–414.
47. Cackler T., Alleman J., Kevern J., Sikkema J. Technology Demonstrations Project: Environmental Impact Benefits With “TX Active” Concrete Pavement in Missouri DOT Two-Lift Highway Construction Demonstration. Final Report I, Iowa State University. 2012. 119 p.

Information about the authors

Antonenko, Marina V. Researcher. E-mail: labuzova326@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, 46 Kostyukova st.

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

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

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

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Губарева Е.Н. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы, свойства, применение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25

For citation:

Antonenko M.V., Ogurtsova Yu.N., Strokov V.V., Gubareva E.N. Photocatalytic active self-cleaning cement-based materials. Compositions, properties, application. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33

***Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: markovandrey11@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ПРИСУТСТВИИ ТОПЛИВНЫХ ЗОЛ

Аннотация. Снижение количества потребления наиболее широко распространенного и дорогостоящего в строительстве неорганического вяжущего гидратационного типа твердения – портландцемента – является одной из важнейших задач для строительной отрасли. В свете сложившейся тенденции ресурсо- и энергосбережения, а также снижения экологического прессинга большой интерес представляет использование отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол различных типов (кислая, основная), представляющих собой тонкодисперсное сырье преимущественно алюмосиликатного состава, скопившегося в отвалах топливоперерабатывающих предприятий. В работе произведен анализ влияния минеральных добавок в виде топливных зол, использование которых предусматривает замену части портландцемента (15–30 % от общей массы портландцемента, с шагом 5 %), на кинетику твердения вяжущего. На основании результатов испытаний на прочность образцов вяжущего с добавками произведен расчет прогнозирования прочности, на основе теории переноса. Проведен анализ кинетики набора прочности портландцемента как на ранних, так и на поздних сроках твердения; установлена эффективность и оптимальная концентрация применения топливных зол в зависимости от типа.

Ключевые слова: топливная зола, минеральная добавка, неорганическое вяжущее, портландцемент.

Введение. Вопросы применения отходов топливно-энергетических предприятий в строительной индустрии имеют богатую историю, но актуальны и в настоящее время. Согласно анализу проведенных исследований, наиболее распространенным направлением использования топливных зол является получение композиционных материалов различного назначения на основе вяжущего гидратационного типа твердения – портландцемента [1–4]. При этом, интерес представляют, как кислые (или низкокальциевые), так и основные (или высококальциевые) топливные золы, в силу того, что первые обладают пуццолановой активностью, а вторые, как правило, имеют в составе компоненты, которые наравне с клинкерными минералами активно участвуют в процессе гидратации.

Кроме особенностей по составу данный вид сырья при переходе от одного типа к другому имеет различие в морфологии поверхности частиц, гранулометрическом составе, донорно-акцепторной способности и т.п., что обусловлено видом сжигаемого угля, технологией его сжигания и удаления образовавшихся остатков в виде зол («мокрая» или «сухая»). Опыт исследований влияния топливных зол на цементные системы показывает положительные результаты [5–10]. Так применение золы позволяет получать, например, жаропрочные или гидротехнические (в некоторых случаях количество золы достигает 50 %) бетоны [11–13]. При этом, золы в составе

цементного вяжущего могут проявлять пластифицирующую и водоудерживающую способность [14–16]. Установлено, что прочность бетонов с применением зол напрямую зависит от ее площади удельной поверхности [17–18].

Несмотря на накопленный опыт исследований, прочность цементного вяжущего с использованием зол определяется практически, что требует больших временных затрат. Однако, учитывая физико-механические, физико-химические и структурные особенности топливных зол при подборе типа и количества зол для получения модифицированного вяжущего с оптимальным набором прочностных характеристик, возможно применение расчетной методики, разработанной д.т.н., профессором Рахимбаевым Ш.М. [19], которая предполагает расчет коэффициента торможения процесса гидратации цемента на основании данных о кинетике набора прочности материала в течении 28 суток. Расчет прогнозируемой прочности был разработан для классических цементных систем [20, 21], но применялся и для композиционных вяжущих [22].

Таким образом, учитывая высокую точность прогнозирования прочности вяжущих с применением указанной методики, а также ее экспрессность, представляется актуальным ее использование по отношению к цементам с применением топливных зол различных типов.

Методология. Расчет прогнозируемой прочности вяжущего предусматривает изучение кинетики набора прочности в течении 28 суток. Для

этого на основе исследуемых сырьевых материалов были подготовлены образцы-балочки размером 4×4×16 см и определена их прочность при сжатии на 1, 3, 7 и 28 сутки. Полученные результаты испытаний явились исходными данными для дальнейших расчетов.

С целью изучения кинетики набора прочности и дальнейшего расчета прогнозируемой прочности модифицированного вяжущего в качестве сырьевых материалов применялись:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент»;
- основная (или высококальциевая) топливная зола Назаровской ТЭС (Красноярская обл.), полученная при сжигании бурого угля Ирша-Бородинского месторождения;
- кислая (или низкокальциевая) топливная зола Троицкой ГРЭС (Челябинская обл.), полученная при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения.

Следует отметить, что топливные золы использовались в качестве активной минеральной добавки к цементу в интервале от 15 до 30 % от общей массы цемента с шагом 5 %. Количество воды для затворения принимали в соответствии с определенной ранее водопотребностью топливных зол по распылу конуса. Так для вяжущего с использованием высококальциевой топливной золы Назаровской ТЭС при всех концентрациях водовязущее отношение (В/В) составило 0,39, для вяжущего с использованием низкокальциевой топливной золы В/В увеличивалось с ростом ее количества в составе вяжущего. При использовании 15, 20, 25 и 30 % низкокальциевой топливной золы Троицкой ГРЭС В/В составило соответственно 0,39, 0,40, 0,41 и 0,42.

В основу используемого в работе расчета положена теория переноса. На основе анализа кинетики ряда важных процессов при производстве и эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций выделяют два частных случая, которые представляются следующими уравнениями:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_1 \times \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_2 \times \tau, \quad (2)$$

где τ – время твердения (гидратации), сут; σ – предел прочности при сжатии, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

На основании уравнений, характеризующих частные случаи, с учетом начальной скорости набора прочности и коэффициента ее торможения для определения прогнозной прочности вяжущих была выведена следующая формула:

$$\sigma = \frac{\tau \times U_0}{1 + \tau \times U_0 \times K_{\text{тор}}} \quad (3)$$

где U_0 – начальная скорость; $K_{\text{тор}}$ – коэффициент торможения.

Основная часть. Анализ кинетики твердения портландцемента с использованием минеральных добавок в виде топливных зол в первые 28 суток показывает, что при использовании кислой (или низкокальциевой) золы Троицкой ГРЭС прочность вяжущего при всех концентрациях превышает этот же показатель для контрольного образца (табл. 1). Следует отметить, что в первые сутки при использовании кислой золы в количестве 15 и 30 % прочность образцов при сжатии превышает контрольное значение практически на 2 МПа. При использовании этой же золы в количестве 20 и 25 % прочность образцов вяжущего близка к прочности контрольного образца.

Примерно такая же тенденция сохраняется и на 3 сутки. Однако, значения прочности при всех концентрациях минеральной добавки ниже, чем у образца без нее (на 15,5–45,5 %).

При испытании образцов модифицированного вяжущего на 7 сутки ситуация существенно меняется. Так при использовании кислой золы в количестве 15, 20 и 30 % прочность в среднем на 27,5 % ниже, у образцов без добавки. Обращают на себя внимание образцы с использованием золы Троицкой ГРЭС в количестве 25 %. Среднее значение прочности образцов в этом случае составляет 29 МПа, что лишь на 8,3 % ниже контрольного значения.

Так же существенно выделяются значения прочности при сжатии в результате испытания образцов с концентрацией кислой топливной золы в количестве 25 % и на 28 суток. При этом прочность образцов модифицированного вяжущего превышает прочность образцов без добавки на 2 %.

В случае с высококальциевой золой Назаровской ТЭС (табл. 1) на первые сутки испытаний среди образцов модифицированного вяжущего наибольшими значениями прочности отличаются образцы, содержащие 15 и 30 % добавки. Однако, это на 31,1 и 19,2 % соответственно ниже, чем прочность контрольного образца, что весьма существенно. Данный факт свидетельствует о том, что использование основной топливной золы Назаровской ТЭС тормозит процесс твердения портландцемента на начальном этапе.

На 3 сутки прочность образцов портландцемента с использованием всех концентраций высококальциевой золы существенно возрастает и превышает контрольное в среднем на 12 %.

При испытании образцов на 7 сутки максимальными значениями отличаются образцы с ис-

пользование основной топливной золы Назаровской ТЭС с содержанием 15 %. В данном случае

значение прочности лишь на 0,5 % ниже контрольного.

Таблица 1

Кинетика твердения портландцемента с добавками топливных зол

№ п/п	Наименование и количество добавки	Прочность на сжатие, МПа			
		1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
1	без добавки	8,30	20,80	31,20	43,10
2	зола Троицкой ГРЭС 15 %	10,04	17,57	22,66	37,27
3	зола Троицкой ГРЭС 20 %	8,47	14,19	22,16	31,19
4	зола Троицкой ГРЭС 25 %	8,50	11,96	28,63	43,99
5	зола Троицкой ГРЭС 30 %	10,23	15,39	23,10	33,98
6	зола Назаровской ТЭС 15 %	5,72	24,02	31,03	41,09
7	зола Назаровской ТЭС 20 %	2,52	23,03	24,26	28,11
8	зола Назаровской ТЭС 25 %	3,81	23,59	27,17	36,93
9	зола Назаровской ТЭС 30 %	6,71	22,75	24,69	31,73

Наиболее высоким значением прочности на сжатие на 28 сутки отличаются образцы на основе портландцемента с использованием 15 % основной топливной золы. Однако, значение прочности более чем на 3 % отличается от значения, регламентируемого ГОСТ (42,5 МПа), и почти на 5 % – от фактического значения прочности образцов без добавки.

Таким образом, на основании анализа кинетики набора прочности образцов вяжущего на основе портландцемента с использованием минеральных добавок в виде топливных зол различных типов можно сделать вывод, что наиболее эффективной точки зрения достижения марочной прочности модифицированного вяжущего показывает себя кислая топливная зола Троицкой ГРЭС, что не противоречит сложившимся представлениям о влиянии зол на цементные системы. Однако, для достижения необходимой прочности требуется 25 % добавки. При использовании высококальцевой золы, в силу содержания клинкерных минералов, процесс набора прочности идет гораздо быстрее на 3 и 7 сутки, при этом требуется лишь 15 % процентов добавки. Однако, на 28 сутки прочность образцов на основе модифицированного вяжущего ниже требуемой.

На основании полученных данных о кинетике набора прочности цемента произведен расчет кинетических констант (табл. 2, 3): U_0 – начальная скорость; $K_{\text{тор}}$ – коэффициент торможения; $K_{\text{кор}}$ – коэффициент корреляции.

Из таблиц видно, что использование кислой топливной золы Троицкой ГРЭС в любом количестве снижает начальную скорость, тогда как при использовании основной топливной золы Назаровской ТЭС, в частности при использовании 30 %, этот коэффициент возрастает по отношению к данному коэффициенту для контрольного контрольного состава на 5 %. Соответ-

ственно, в связи со снижением начальной скорости твердения возрастает коэффициент торможения в обоих случаях. Исключением, является лишь 25 %-ная концентрация кислой топливной золы. Это позволяет сделать вывод о том, что в присутствии топливных зол снижается интенсивность процесса гидратации портландцемента ввиду существенного снижения его количества.

Таблица 2

Результаты расчёта по уравнениям теории переноса для вяжущего, модифицированного кислой топливной золой Троицкой ГРЭС

№ п/п	Наименование и концентрация добавки	Значения кинетических констант при расчёте		
		U_0	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
1	без добавки	11,18	0,198	0,999
2	зола Троицкой ГРЭС 15 %	9,59	0,0234	0,995
3	зола Троицкой ГРЭС 20 %	9,03	0,0282	0,999
4	зола Троицкой ГРЭС 25 %	7,19	0,0178	0,9823
5	зола Троицкой ГРЭС 30 %	9,86	0,0260	0,9976

Таблица 3

Результаты расчёта по уравнениям теории переноса для вяжущего, модифицированного основной топливной золой Назаровской ТЭС

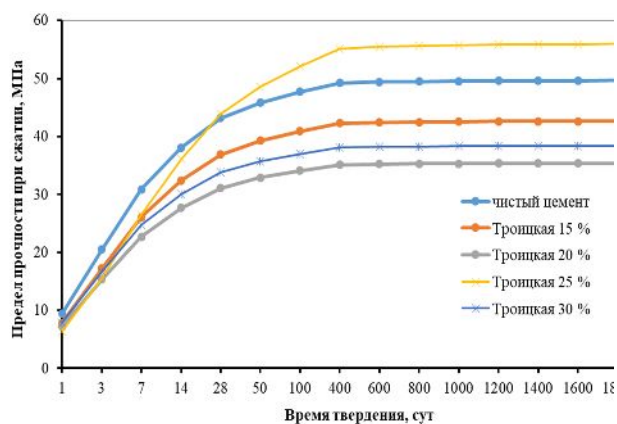
№ п/п	Наименование и концентрация добавки	Значения кинетических констант при расчёте		
		U_0	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
1	без добавки	11,18	0,198	0,999
2	зола Назаровской ТЭС 15 %	9,73	0,0204	0,9881
3	зола Назаровской ТЭС 20 %	5,61	0,0282	0,9247
4	зола Назаровской ТЭС 25 %	7,08	0,0216	0,9646
5	зола Назаровской ТЭС 30 %	11,76	0,0284	0,9963

Таблица 4

Расчетные прочности цементного камня, модифицированного кислой топливной золой Троицкой ГРЭС, в возрасте 28 суток

№ п/п	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{эксперим}$, МПа	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
1	36,87	37,27	0,40	1,08
2	31,10	31,19	0,09	0,29
3	43,92	43,99	0,07	0,15
4	33,76	33,98	0,22	0,65

В результате расчета прогнозируемой прочности на 28 суток с использованием полученных кинетических констант было установлено, что экспериментальные и расчетные значения имеют высокую сходимость (табл. 4, 5).



На основании полученных данных был произведен расчет по прогнозированию набора прочности на длительный срок (рис. 1).

Таблица 5

Расчетные прочности цементного камня, модифицированного основной топливной золой Назаровской ТЭС, в возрасте 28 суток

№ п/п	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{эксперим}$, МПа	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
1	41,54	41,09	0,45	1,11
2	28,93	28,11	0,82	2,92
3	37,53	36,93	0,60	1,63
4	31,81	31,73	0,08	0,25

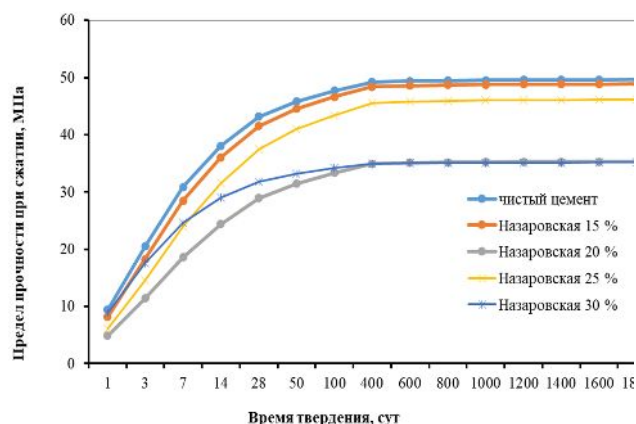


Рис. 1. Расчетная кинетика набора прочности вяжущих в зависимости от состава: а) с использованием кислой топливной золы; б) с использованием основной топливной золы

Анализ кинетики набора прочности образцов модифицированного цемента в течении первых 28 суток свидетельствует о схожести характера процессов твердения не зависимо от типа применяемой золы в качестве добавки и ее концентрации. Из графиков (рис. 1) видно, что наиболее интенсивный рост прочности приходится на первые 7 суток, а выполаживание кривых после отметки 400 суток свидетельствует о завершении процессов гидратации как модифицированного, так и портландцемента без добавки. При этом расчетная прогнозируемая прочность при использовании добавок как низко-, так и высококальциевой золы в большинстве случаев ниже чем у образцов цемента без добавки. Однако, прогнозируемая прочность цемента с использованием 25 % кислой топливной золы Троицкой ГРЭС характеризуется приростом прочности после 28 суток на 10 % по сравнению с прочностью образцов контрольного состава (рис. 1, а). Практически совпадают по значениям с контрольным составом расчетные данные по определению прогнозируемой прочности вяжущего с использованием 15 % высококальциевой топливной золы (рис. 1, б).

Выводы. Таким образом, в результате анализа расчетных данных по кинетике набора прочности на длительный срок установлено, что наиболее эффективной с точки зрения модифицирования цемента, подразумевающего замену его части, является кислая (или низкокальциевая) топливная зола Троицкой ГРЭС в силу своей пуццолановой активности. А оптимальная ее концентрация в составе вяжущего гидратационного типа твердения составляет 25 % от массы цемента. При этом, оптимальной концентрацией основной (или высококальциевой) топливной золы Назаровской ТЭС является 15 %, а увеличение количества, несмотря на содержание клинкерных минералов в составе, приводит к значительному снижению набора прочности как на начальных, так и поздних сроках твердения в среднем на 10–30 %.

Источник финансирования. Грант Президента Российской Федерации НШ-2584.2020.8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н.,

Нгуен Д.В.К. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391.

2. Калашников В.И., Тараканов О.В., Белякова Е.А., Мороз М.Н. Новые направления использования зол ТЭЦ в порошково-активированных бетонах нового поколения // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 22–27.

3. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review // Construction and Building Materials. 2017. No. 144. Pp. 373–384. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.

4. Zhang, T., Du, Y., Sun, Y., He, Z., Wu, Z. Development of magnesium-silicate-hydrate cement by pulverized fuel ash // Key Engineering Materials. 2016. No. 709. P. 61–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.709.61.

5. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М., Челмакин А.Ю. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной среды бактерий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 11–17.

6. McCarthy M.J., Tittle P.A.J., Dhir R.K. Corrosion of reinforcement in concrete containing wet-stored fly ash // Cement & concrete composites. 2019. No. 102. P. 71–83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.003.

7. Oproiu C., Voicu G., Nicoara A.I., Badanoiu A.I. The Influence of Partial Substitution of Raw Materials with Heavy Ash on the Main Properties of Portland Cements // Revista de chimie. No. 69. R. 4. P. 860–863.

8. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., (...), Nito N., Hirao H. Effect of C₃S content of clinker on properties of fly ash cement concrete // Journal of Building Engineering. 2020. 29,101107. DOI: 10.1016/j.job.2019.101107.

9. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume // Construction and Building Materials. 2020. 239,117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888.

10. Hamzaoui R., Guessasma S., Abahri K., Bouchenafa O. Formulation of Modified Cement Mortars Using Optimal Combination of Fly Ashes, Shiv, and Hemp Fibers // Journal of materials in civil engineering. 2020. 04019354. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002918.

11. Лам Т.В., Хунг Н.С., Зиен В.К., Чык Н.Ч., Булгаков Б.И., Баженова О.Ю., Гальцева Н.А. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21.

12. Бондаренко Д.О., Строкова В.В., Тимошенко Т.И., Роздольская И.В. Плазмохимическое модифицирование облицовочного композиционного материала на основе полых стеклянных микросфер с защитно-декоративным покрытием // Перспективные материалы. 2018. № 8. С. 72–80. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-8-72-80.

13. Oliva M., Vargas F., Lopez M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems // Journal of cleaner production. 2019. No. 223. P. 1029–1041. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.147.

14. Нетеса Н.И., Паланчук Д.В., Нетеса А.Н. Легкие бетоны с золой-уноса приднепровской ТЭС // Наука та прогрес транспорту. 2013. № 5 (47). С. 137–145.

15. Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska-Siedlarz A. Influence of Cements Containing Calcareous Fly Ash on Rheological Properties of Fresh Mortars and Its Variability // RILEM Bookseries. 2020. No. 23. P. 87–96. DOI: 10.1007/978-3-030-22566-7_11.

16. Mukilan K., Chithambar Ganesh A., Azik A. Investigation of utilization of Flyash in Self Compacting Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 154495. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012056.

17. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Баженов Д.А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 3 (126). С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.

18. Quan H., Kasami H. Experimental study on effects of type and replacement ratio of fly ash on strength and durability of concrete // Open Civil Engineering Journal. 2013. No. 7(1). P. 93–100. DOI: 10.2174/1874149520130708004.

19. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица, 1993. С. 8.

20. Кафтаева М.В. Регулирование свойств мелкозернистых бетонов с пониженным содержанием золы: дис. ... канд. техн. наук. Кафтаева М.В.; БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2000. 184 с.

21. Поспелова М.А. Регулирование кинетики твердения цементных систем химическими добавками: дис. ... канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г.Шухова. Белгород, 2003. 130 с.

22. Фоменко Ю.В. Мелкозернистый бетон для тротуарной плитки с пониженным высолкообразованием: авторефер. дис. ... канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г.Шухова. Белгород, 2007. 22 с.

Информация об авторах

Макров Андрей Юрьевич, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: markovandrey11@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Безродных Андрей Александрович, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: andron93@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Маркова Ирина Юрьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: irishka-31.90@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Дмитриева Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Степаненко Маргарита Андреевна, магистрант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: stepanenko.rita2017@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2019 г.

© Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А., 2020

***Markov A.Y., Bezrodnykh A.A., Markova I.Y., Strokov V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: markovandrey11@gmail.com

FORECASTING STRENGTH OF PORTLAND CEMENT IN THE PRESENCE OF FUEL ASHES

Abstract. Reducing the consumption of the most widespread and expensive in construction inorganic binder of hydration hardening type – Portland cement – is one of the most important tasks for the construction industry. With the current trend of resource- and energy-saving, as well as a decrease in environmental pressure, it is of great interest to use wastes from fuel and energy enterprises in the form of various types of ash (acidic, basic), which are finely dispersed raw materials of mainly aluminosilicate composition that have accumulated in large quantities on our country territories. The paper analyzes the effect of mineral additives in the form of fuel ashes, the use of which provides replacement of part of Portland cement (15–30 % of the total mass of Portland cement, in increments of 5 %), on the kinetics of hardening of the binder. Based on the results of the strength tests of binder samples with additives, calculation of predicted strength was carried out according to the methodology by Sh.M. Rakhimbayev based on transfer theory. As a result, the analysis of the kinetics of the Portland cement hardening was carried out both at early and late hardening periods; efficiency and optimal concentration of fuel ashes depending on type have been established.

Keywords: fuel ash, mineral additive, inorganic binder, Portland cement.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bahrah A.M., Larsen O.A., Solov'ev V.N., Nguen D.V.K. High-quality self-compacting concrete using coal combustion wastes [Vysokokachestvennyye samouplotnyayushchiesya betony c

ispol'zovaniem othodov szhiganiya uglya]. Vestnik of MGSU. 2017. Vol. 12. Vol. 12 (111). Pp. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. (rus)

2. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Moroz M.N. New directions in the use of ashes of thermal power plants in powder-activated

concrete of a new generation [Novye napravleniya ispol'zovaniya zol TEC v poroshkovo-aktivirovannyh betonah novogo pokoleniya]. Regional Architecture and Engineering. 2013. Vol. 3. Pp. 22–27. (rus)

3. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 144. Pp. 373–384. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.

4. Zhang T., Du Y., Sun Y., He Z., Wu Z. Development of magnesium-silicate-hydrate cement by pulverized fuel ash. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 709. Pp. 61–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.709.61.

5. Erofeev V.T., Kalashnikov V.I., Smirnov V.F., Karpushin S.N., Rodin A.I., Krasnoglazov A.M., Chelmakin A.Yu. Resistance of cement composites on biocidal Portland cement with an active mineral additive under the influence of a model environment of bacteria [Stojkost' cementnyh kompozitov na biocidnom portlandcemente s aktivnoj mineral'noj dobavkoj v usloviyah vozdejstviya model'noj sredy bakterij]. Industrial and civil engineering. 2016. Vol. 1. Pp. 11–17. (rus)

6. McCarthy M.J., Tittle P.A.J., Dhir R.K. Corrosion of reinforcement in concrete containing wet-stored fly ash. Sement & concrete composites. 2019. Vol. 102. Pp. 71–83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.003.

7. Oproiu C., Voicu G., Nicoara A.I., Badanoiu A.I. The Influence of Partial Substitution of Raw Materials with Heavy Ash on the Main Properties of Portland Cements. Revista de chimie. Vol. 69. R. 4. Pp. 860–863.

8. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., (...), Nito N., Hirao H. Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete. Journal of Building Engineering. 2020. 29,101107. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101107.

9. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. Construction and Building Materials. 2020. 239,117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888.

10. Hamzaoui R., Guessasma S., Abahri K., Bouchenafa O. Formulation of Modified Cement Mortars Using Optimal Combination of Fly Ashes, Shiv, and Hemp Fibers. Journal of materials in civil engineering. 2020. 04019354. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002918.

11. Lam T.V., Hung N.S., Zien V.K., CHyk N.CH., Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu., Gal'ceva N.A. Vliyanie vodovyazhushchego otnosheniya i kompleksnoj organomineral'noj dobavki na svojstva

betona dlya morskih gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. Vol. 3. Pp. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21.

12. Bondarenko D.O., Strokova V.V., Timoshenko T.I., Rozdol'skaya I.V. [Plazmohimicheskoe modifizirovanie oblicovochnoy kompozitsionnoy materiala na osnove polyh steklyannyh mikrosfer s zashchitno-dekorativnym pokrytiem]. Promising materials. 2018. Vol. 8. Pp. 72–80. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-8-72-80. (rus)

13. Oliva M., Vargas F., Lopez M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. Journal of cleaner production. 2019. Vol. 223. Pp. 1029–1041. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.147.

14. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkie betony s zoloy-unosa pridneprovskoy TES. Nauka ta progres transportu. 2013. Vol. 5 (47). Pp. 137–145. (rus)

15. Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska-Siedlarz A. Influence of Cements Containing Calcareous Fly Ash on Rheological Properties of Fresh Mortars and Its Variability. RILEM Bookseries. 2020. Vol. 23. Pp. 87–96. DOI: 10.1007/978-3-030-22566-7_11.

16. Mukilan K., Chithambar Ganesh A., Azik A. Investigation of utilization of Flyash in Self Compacting Concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 154495. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012056.

17. Harchenko A.I., Alekseev V.A., Harchenko I.Ya., Bazhenov D.A. The structure and properties of fine-grained concrete based on composite binders [Struktura i svojstva melkozernistykh betonov na osnove kompozitsionnykh vyazhushchih]. Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. No. 3 (126). Pp. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331. (rus)

18. Quan H., Kasami H. Experimental study on effects of type and replacement ratio of fly ash on strength and durability of concrete. Open Civil Engineering Journal. 2013. Vol. 7(1). Pp. 93–100. DOI: 10.2174/1874149520130708004.

19. Rahimbaev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials. Resource-saving technologies of building materials, products and structures [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Weselitz, 1993. Pp. 8. (rus)

20. Kaftaeva M.V. Regulation of the properties of fine-grained concrete with a decreased content of ash [Regulirovanie svojstv melkozernistykh betonov s ponizhennym soderzhaniem zoly]: thesis for the degree of candidate of sciences. Kaftaeva M.V.;

BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2000. 184 p. (rus)

21. Pospelova M.A. Regulation of the kinetics of cement systems hardening with chemical additives [Regulirovanie kinetiki tverdeniya cementnyh sistem himicheskimi dobavkami]: thesis for the degree of candidate of sciences. Pospelova M.A.: BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2003. (rus)

22. Fomenko Yu.V. Fine-grained concrete for paving slabs with low efflorescence [Melkozernistyj beton dlya trotuarnoj plitki s ponizhennym vysolobrazovaniem]: abstract of a thesis for the degree of candidate of sciences. Fomenko Yu.V.: BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2007. 22 p. (rus)

Information about the authors

Markov, Andrew Y. Postgraduate student. E-mail: markovandrey11@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bezrodnykh, Andrew A. Postgraduate student. E-mail: andron93@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Markova, Irina Y. PhD, Senior lecturer. E-mail: irishka-31.90@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Dmitrieva, Tatyana V. PhD, Assistant professor. E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Stepanenko, Margarita A. Bachelor student. E-mail: stepanencko.rita2017@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33

For citation:

Markov A.Y., Bezrodnykh A.A., Markova I.Y., Strokov V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A. Forecasting strength of portland cement in the presence of fuel ashes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 25–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45

***Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А.**

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: olegxxii@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ РУБАШКОЙ

Аннотация. Цель исследования – экспериментально изучить совместную работу сталефибробетонных (СФБ) рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения для дальнейшей разработки методики расчёта данного способа усиления изгибаемых элементов. Основные результаты исследования состоят в оценке прочности, жёсткости, трещиностойкости, а также характере разрушения с картиной развития трещин для рассмотренных 4 образцов (двух с рубашкой усиления, двух – контрольных – без усиления). Установлено, что применение СФБ рубашки толщиной 45 мм и с процентом содержания фибры 2,5 % (при расходе 196 кг/м³) увеличивает разрушающую нагрузку на 20 %, жёсткость от 3,4 до 11 раз по мере нагружения, трещиностойкость до 2,8 раз. Выполнено сравнение полученных результатов с компьютерным моделированием в ПК ANSYS: расхождение нагрузки трещинообразования, разрушения и значения прогибов для натурных образцов и компьютерной модели находятся в пределах 6,3 %, что говорит о достоверности численных результатов и о возможности применения предложенных компьютерных моделей в дальнейших исследованиях по теме статьи.

Ключевые слова: усиление, сталефибробетон, изгибаемый элемент, экспериментальные исследования, ошибки проектирования.

Введение. К сожалению, часто необходимость усиления железобетонных конструкций вызвана ошибками при проектировании или монтаже, перечень которых весьма многообразен. Так по данным экспертов по технической диагностике зданий группы компаний «Городской центр экспертиз» [1] на долю строительно-монтажных работ приходится 32 % случаев, низкое качество строительных материалов – 9 %, ошибки при проектировании – 6 % (статистика за период с мая 2017 г. по май 2018 г.). Причём эти ошибки могут быть обнаружены ещё на стадии строительства, точнее до приложения проектных нагрузок на данную конструкцию. Тогда она может не иметь повреждений и быть изготовлена из нового недавно затвердевшего бетона. Использование в таких ситуациях для усиления наиболее экономичных методов и материалов является актуальной задачей. Весьма перспективным для этого является сталефибробетон (СФБ). Он обладает относительно высокой прочностью на сжатие, высокой прочностью на растяжение, деформационным упрочнением при растяжении (при определенном объеме стальных волокон) и очень низкой проницаемостью, поскольку используется оптимизированная плотная матрица [1, 2, 3]. Отметим, что сталефибробетонные рубашки уже были успешно применены при усилении вертикальных и горизонтальных несущих элементов здания школы в Дзагароло в Италии, а также на других объектах.

К настоящему времени проведены экспериментальные и численные исследования усиленных бетонных балок с помощью сверхвысокопрочного сталефибробетона UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) и высокопрочного бетона, результаты которых показали увеличение изгибной и сдвиговой жёсткости, как в предельном, так и в эксплуатационном состоянии [4, 5, 6]. В [7, 8] показано, что усиление железобетонных балок, повреждённых на 80–90 %, существенно увеличивает их несущую способность и жёсткость. Серия экспериментальных исследований, проведенных на железобетонных балках, усиленных сверхвысокопрочным сталефибробетоном в качестве дополнительного растянутого элемента, показывает значительное увеличение прочности в 2,0–2,8 раза по сравнению с контрольными балками [9, 10]. Также было исследовано усиление колонн и плит перекрытия [11, 12], результаты показали значительное увеличение прочности на изгиб и сдвиг. Большинство исследовательских работ [13–18] подчеркивают две существенные особенности сверхвысокопрочного фибробетона: долговечность и прочность. Исследования механических свойств UHPFRC показали, что прочность на сжатие может достигать 150 МПа, увеличение процента стальных волокон приводит к увеличению прочности на изгиб [19]. Подтверждением эффективности использования СФБ служат исследования работы изгибаемых

железобетонных элементов, усиленных СФБ рубашками, на основе компьютерного моделирования в ПК ANSYS [20].

Важно также отметить, что на сегодняшний день в нормативной литературе [СП 349.1325800.2017] расчёт усиленных конструкций сводится к формулам расчёта железобетонных конструкций [СП 63.13330], то есть напряженно-деформированное состояние усиленной конструкции рассматривается в предельном состоянии с оговоркой, что необходимо использовать коэффициенты условий работы для недостаточной разгрузки равным 0,9 для бетона и арматуры.

В связи со всем вышеизложенным целью данной работы ставилось экспериментально изучить совместную работу сталефибробетонных рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения для дальнейшей разработки методики расчёта данного способа усиления изгибаемых элементов.

При этом, на первом этапе экспериментального исследования, для упрощения задачи приняты следующие предпосылки:

– бетон для изготовления балок и рубашек, принимается приблизительно одного возраста,

поэтому различие реологических свойств более старого бетона и относительно нового не учитывается;

– необходимость в усилении вызвана ошибками при проектировании или при строительно-монтажных работах, что выявляется до приложения проектных нагрузок – это допускает не рассматривать начальные повреждения в виде силовых трещин.

Методика натурных испытаний железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой.

На первом этапе исследований авторами было проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния балок, усиленных СФБ рубашкой, результаты которого опубликованы в [20]. При этом достоверность результатов моделирования была подтверждена сравнением с опытными данными [6] и оно позволило вскрыть механизмы разрушения и действительную работу усиленных конструкций, расширить область исследований и, в конечном счёте, уже в данной статье рационально спланировать программу физического эксперимента (табл. 1) по изучению совместной работы СФБ рубашки и железобетонной балки.

Таблица 1

Программа натурального испытания

№ серии		1	2
Маркировка балок		Б-2, Б-4	Б-1р, Б-3р
Количество		1+1	1+1
Параметры ж/б балки	Сечение, мм	120×220	120×220
	Длина, мм	1810	1810
	Армирование	2Ø10 А400	2Ø10 А400
	Класс бетона	В25 ($R_b=31,9$ МПа; $R_{bt}=2,07$ МПа; $E_b=29\,787$ МПа)	В25 ($R_b=31,9$ МПа; $R_{bt}=2,07$ МПа; $E_b=29\,787$ МПа)
Параметры рубашки усиления	Класс бетона матрицы	-	В25 ($R_b=35,8$ МПа; $R_{bt}=2,21$ МПа; $R_{bnt}=4,43$ МПа; $E_b=31\,353$ МПа)
	Армирование	-	Размер фибры: 0,7×0,8×35мм
	Толщина, мм	-	45

Таким образом, для проведения натурального эксперимента были изготовлены 2 серии образцов:

1 серия – железобетонные балки без усиления – контрольные образцы – два «близнеца» Б-2, Б-4 (рис. 1, а);

2 серия – балки, усиленные СФБ рубашкой – близнецы Б-1р, Б-3р (рис. 1, б).

Программа эксперимента представлена в таблице 1.

Балки были изготовлены на казанском заводе ЖБИ-3 в опалубочных формах для оконных перемычек габаритами 1810×220×120 из бетона

класса В25. Дозировка материалов на 1 м³: цемент М350 – 475 кг, песок – 600 кг, щебень и гравий – 1150 кг, вода – 125 кг, пластификатор – 5 кг, универсальная добавка РСТ – 7 кг.

Армирование балок в зоне чистого изгиба было выполнено только у нижней грани стержнями 2Ø10 мм А400 (коэффициент армирования $\mu=0,59\%$). На приопорных участках балок (в «пролёте среза») дополнительно устанавливались стержни и у верхней грани 2Ø6 А400 (коэффициент армирования $\mu=0,216\%$) для того, чтобы обеспечить возможность установки поперечных хомутов – Ø6 А240 с шагом 100 мм.

При этом принятое армирование отвечало следующим расчётным требованиям:

– армирование поперечной хомутами принималось с запасом для исключения возможности разрушения по наклонным сечениям;

растянутая продольная арматура подбиралась таким образом, чтобы разрушение по нормальному сечению происходило при достижении

арматуры предела текучести (случай пластичного разрушения, $\xi < \xi_R$).

Испытание балок проводилось в лаборатории кафедры ЖБиКК КГАСУ (г. Казань). Нагрузка производилась с помощью испытательной машины ГРМ-1 (мощностью 50 тс, рис. 2) по схеме, представленной на рис. 3.

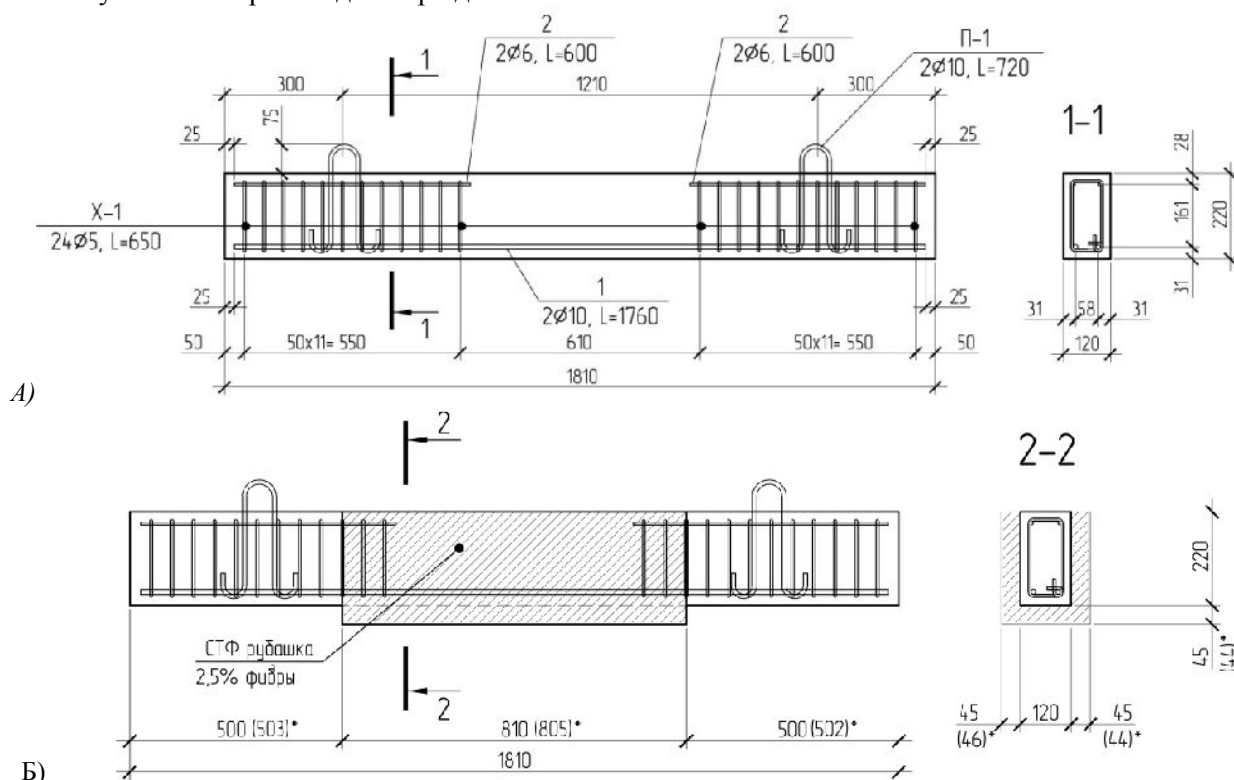


Рис. 1. Схема армирования и геометрические размеры балок (44)* - фактический размер с отклонением от проектного значения



Рис. 2. Испытательная машина ГРМ-1 и готовая к эксперименту усиленная балка Б-1р.

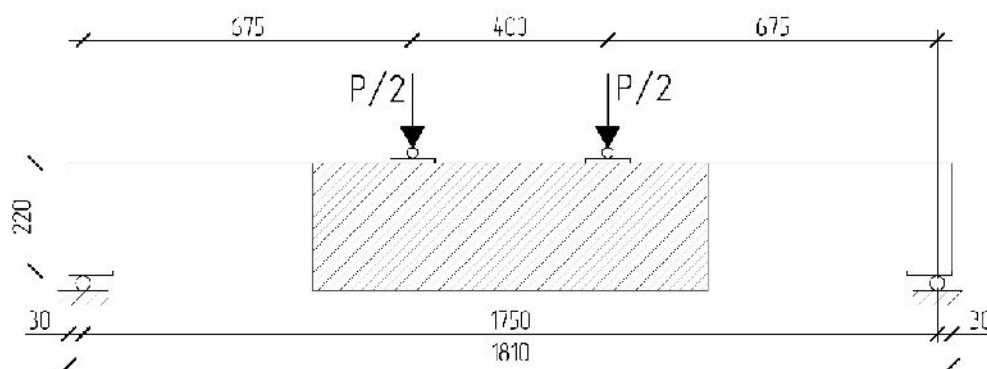


Рис. 3. Расчётная схема испытания балок

Для измерений деформаций в характерных точках балок, наклеивались тензорезисторы, что показано на рис. 4. При этом часть тензодатчиков наклеивалась на рабочую арматуру, другая часть – на бетон балки и ещё часть – на бетон рубашки. Все тензорезисторы были подключены к тензометрической станции ZET 017-T8 через мостовую схему.

До возведения рубашки на бетонной поверхности усиленных балок создавалась шероховатость с помощью электрического перфоратора. Это, как показали результаты опытов далее, обеспечило надёжное сцепление рубашки с балкой (рис. 5). При этом СФБ рубашка бетонировалась непосредственно в

лаборатории путем заливки бетонной смеси, приготовленной по рекомендациям [ОДМ 218.2.014-2011], в открытую сверху опалубку соответствующих размеров. Сталефибробетонная смесь вибрировалась штыкованием.

Для фиксации прогибов и подвижки опор использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм и штангенциркуль с ценой деления 0,02 мм. Схема расположения измерительных приборов показана на рисунке 2. Нагрузка прикладывалась с шагом 300–400 кг, что соответствовало 5–7 % от разрушающей нагрузки.

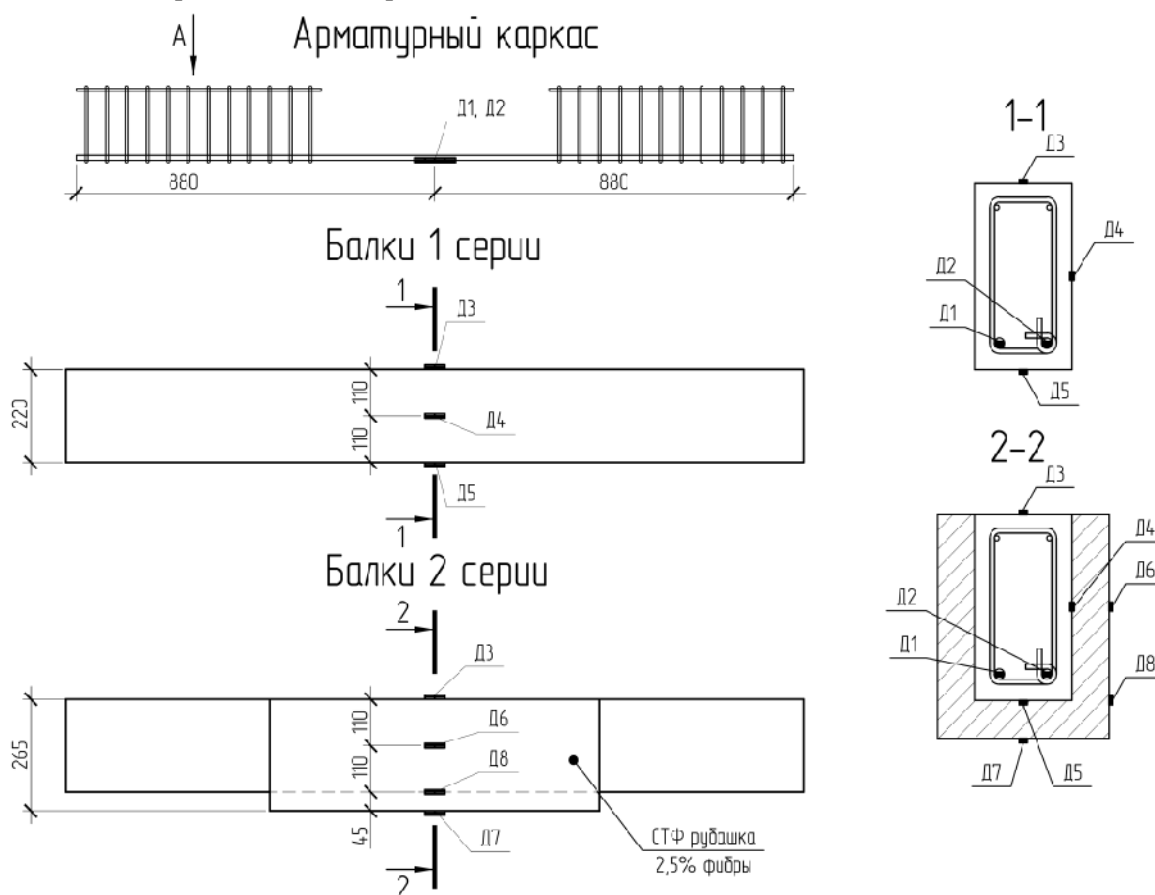


Рис. 4. Схема расположения тензодатчиков в балках

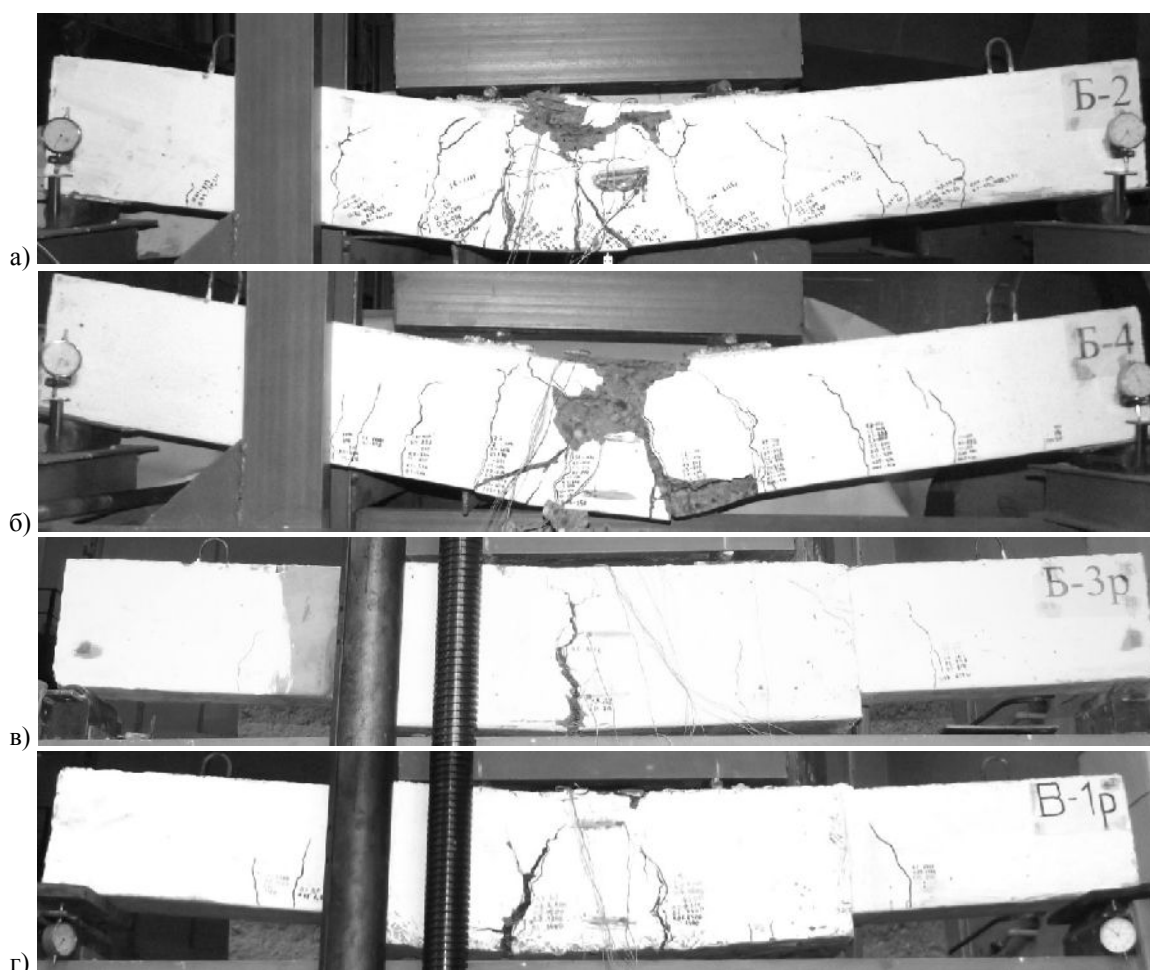


Рис. 5. Шероховатая поверхность усиленной балки

Результаты натурного испытания.

По результатам испытаний установлено, что все образцы разрушились по нормальному сечению вследствие образования вертикальных

трещин и достижения напряжений в арматуре предела текучести. Картина разрушенных образцов показана на рис. 6.

Рис. 6. Образцы после разрушения
а), б) 1-ой серии, в), г) 2-ой серии

Первые трещины в контрольных образцах появились при нагрузке, поданной прессом, $P_{crc}=1$ тс, разрушающая нагрузка составила $P_{ult}=4,8$ тс. График прогиба балок показан на рис. 7.

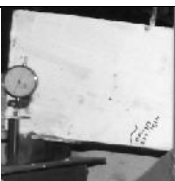
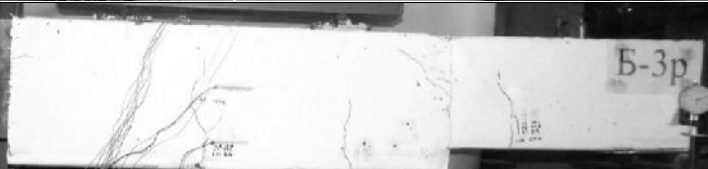
Первые трещины на поверхности бетона для усиленной балки Б-3р появились при нагрузке, поданной прессом, 2,468 тс, на поверхности СФБ рубашки при нагрузке 2,868 тс. Для балки Б-1р на поверхности бетона при – 1,352 тс, на

поверхности рубашки при – 2,452 тс. Разрушающая нагрузка для балки Б-3р составила 5,84 тс, для Б-1р – 5,45 тс. График прогиба балок показан на рис. 7.

Картина развития трещин для балок 1 и 2 серии показана в табл. 2.

Таблица 2

Картина развития трещин

Нагрузка	Балки 1-ой серии	
I стадия до $P_{crc,b} = 0,2 * P_{ult}$		
II стадия до P_{ult}		
III стадия $P_{ult} = 4,8$ тс		
Нагрузка	Балки 2-ой серии	
I стадия до $P_{crc,b}^* = 0,278 * P_{ult}$		
II стадия до $P_{crc,fb}^* = 0,62 * P_{ult}$		
III стадия до P_{ult}		
IV стадия $P_{ult} = 5,84$ тс		

Примечание: $P_{crc,b}^*$ – нагрузка появления псевдопластических деформаций в бетоне (основной части балки) вследствие трещинообразования; $P_{crc,fb}^*$ – нагрузка появления трещин в СТФ рубашке.

По мере нагружения нарушение совместной работы СФБ рубашки и железобетонной балки не наблюдалось до нагрузки близкой к разрушающей $0,93P_{ult}$. При этом в работе усиленной конструкции выявлены 4 характерные стадии, что совпало с результатами компьютерного моделирования [20]:

I стадия – упругая работа – линейная зависимость между внешними и внутренними

усилиями, заканчивается стадией Ia, при которой эпюра напряжений в растянутой зоне бетона искривляется;

II – неупругая работа – появление и развитие псевдопластических деформаций в бетоне (основной части балки) вследствие микротрещинообразования, дальнейшее накопление повреждений в материале – нарушение линейной зависимости;

III – появление и развитие видимых трещин в СТФ рубашке;

IV – стадия разрушения – потеря несущей способности балки при достижении предела текучести арматуры.

Несущая способность балок, усиленных СФБ, увеличивается в 1,2 раза (рис. 7).

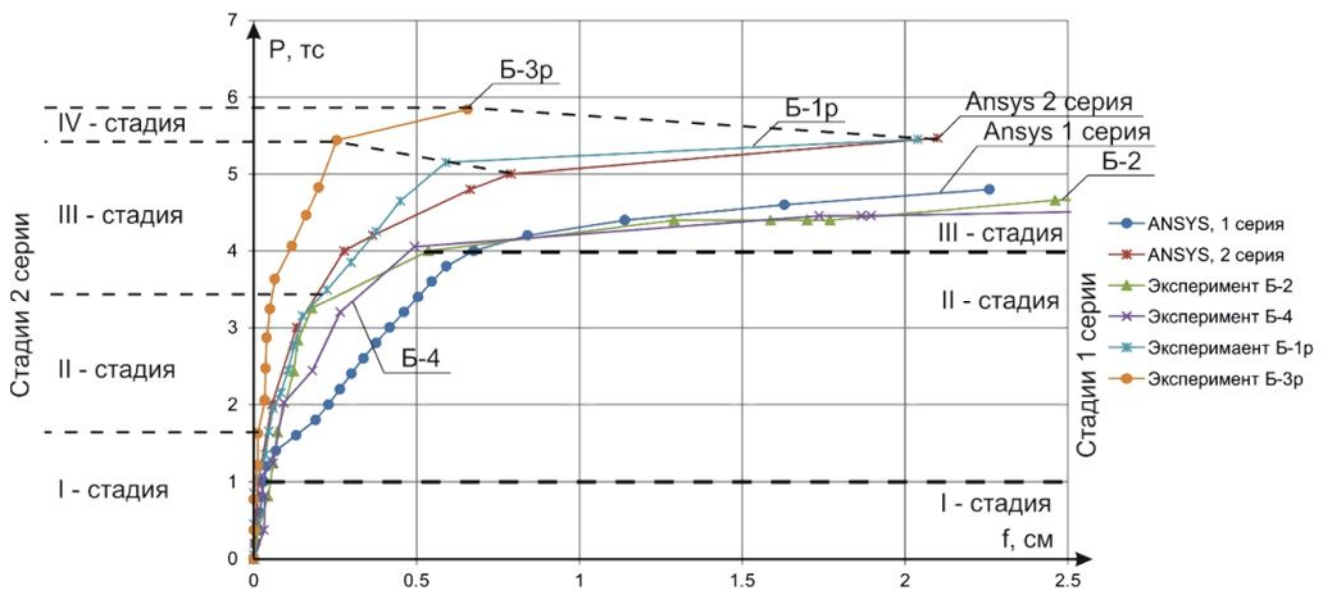


Рис. 7. График «прогиб – нагрузка»

На рис. 8 приведена ширина раскрытия трещины, по которой произошло разрушение, для всех балок.

Напряжения в арматуре в середине пролёта показаны на рис. 9. Эпюры напряжения в бетоне, СФБ в нормальном сечении показаны на рис. 10–12.

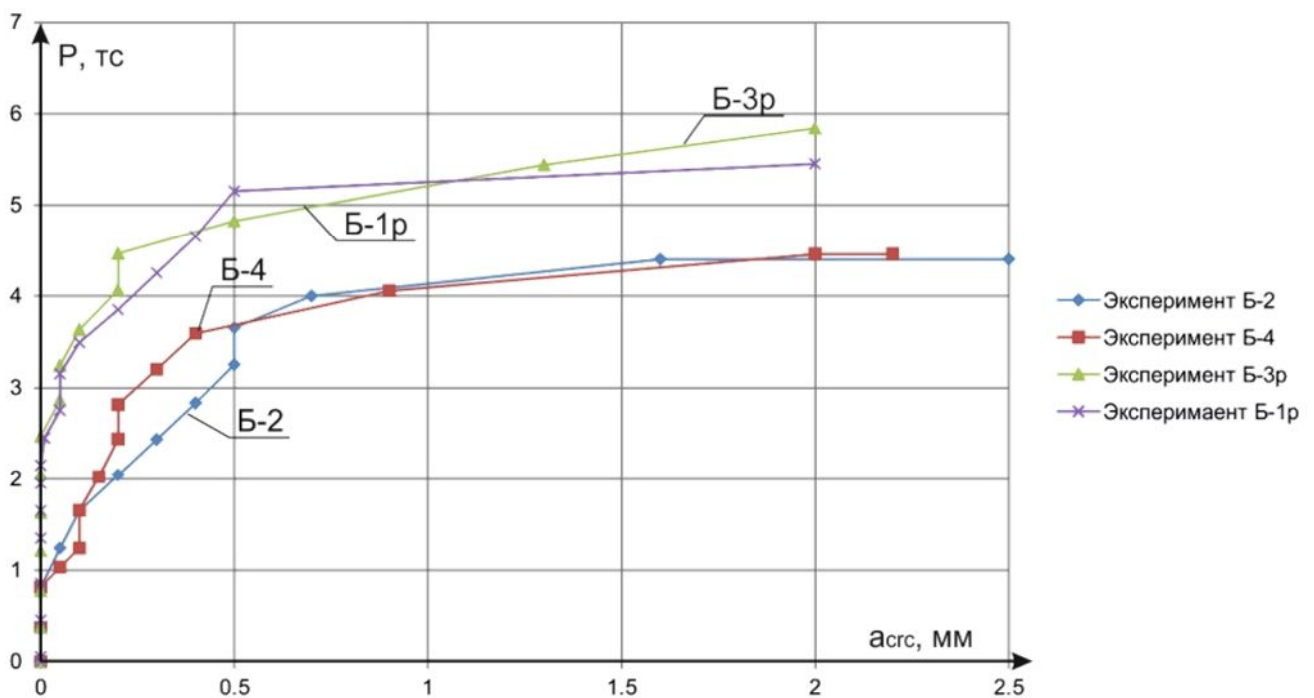


Рис. 8. График «Ширина раскрытия трещины – нагрузка»

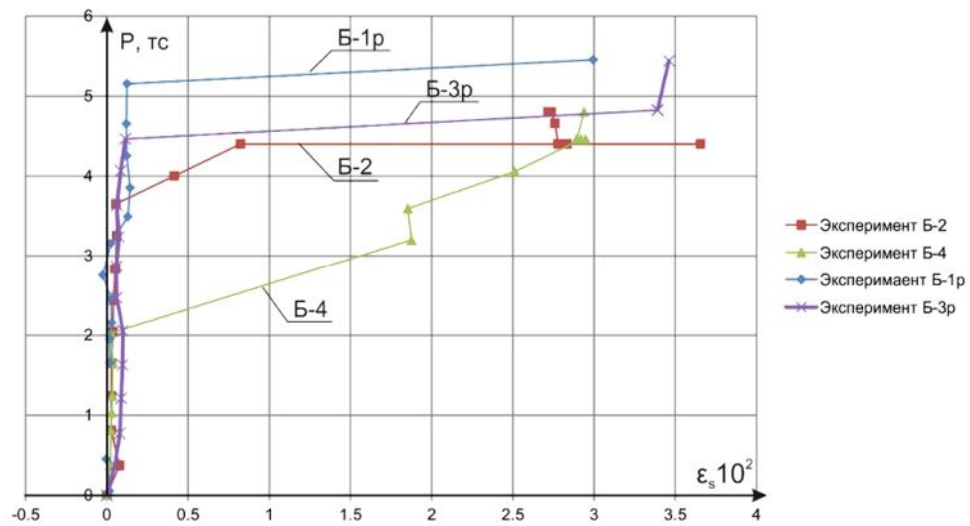


Рис. 9. График «Деформации в арматуре – нагрузка»

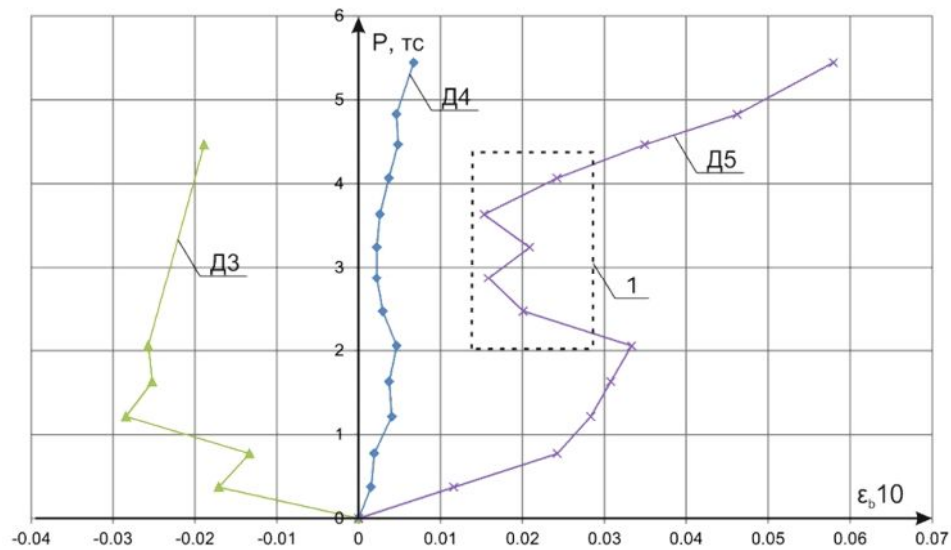


Рис. 10. График «Деформации в бетоне – нагрузка» для балок 2 серии: 1 – этап включения рубашки в работу после образования трещин в бетоне усиленной балки

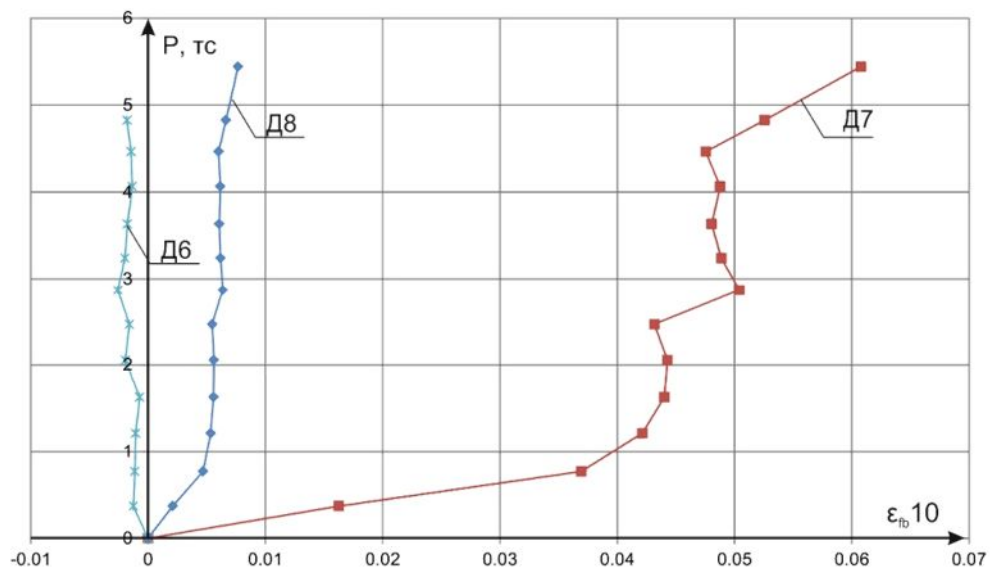


Рис. 11. График «Деформации в СФБ – нагрузка» для балок 2 серии

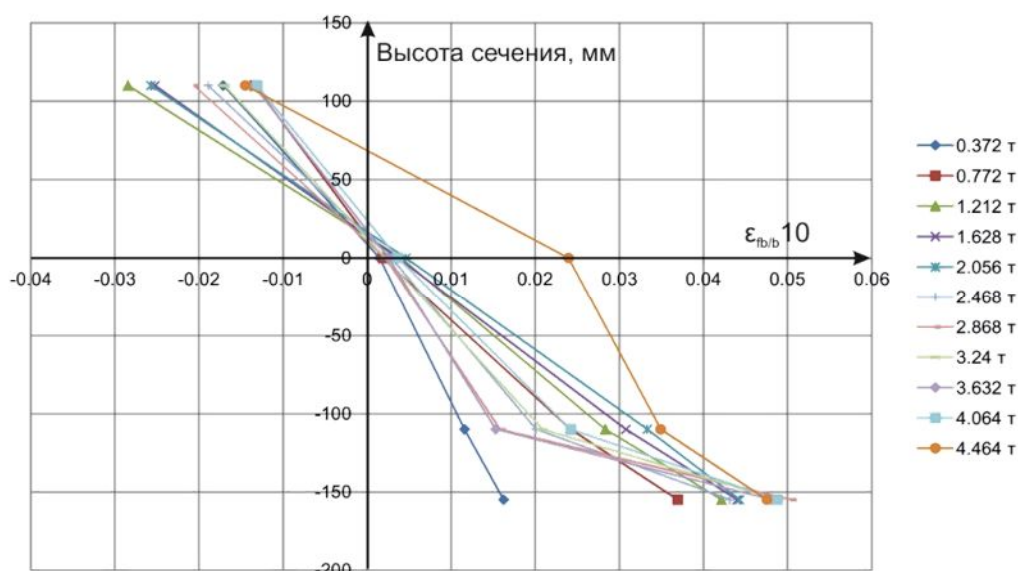


Рис. 12. Эпюры продольных деформаций в бетоне для балок 2 серии в нормальном сечении по мере нагружения

Выводы:

1. Установлено, что применение СФБ рубашки увеличивает разрушающую нагрузку на 20 %, жёсткость от 3,4 до 11 раз (в зависимости от уровня нагрузки), нагрузку появления трещин с 1 тс до 2,4-2,8 тс, нагрузку при допустимом раскрытии трещин $a_{cr,ult}=0,3$ мм (из условия ограничения проницаемости при непродолжительном раскрытии трещин) с 2,436 тс до 4,252 тс. Уменьшает количество трещин более чем в 2 раза, ширину раскрытия трещин (при нагрузке $0,85P_{ult}$ с 0,9 мм до 0,4 мм). Усиление сталефибробетоном наиболее целесообразно в средах с высокой влажностью и коррозионной активностью, а также в пожароопасных условиях, где применение традиционных способов усиления из металлических элементов сопряжено с дополнительными затратами по их защите.

2. Выполнено сравнение полученных результатов с компьютерным моделированием в ПК ANSYS: расхождение нагрузки трещинообразования, разрушения и значения прогибов для натурных образцов и компьютерной модели находятся в пределах 6,3 %, что говорит о достоверности численных результатов и о возможности применения предложенных компьютерных моделей в дальнейших исследованиях по теме статьи.

3. Установлены 4 характерные стадии работы усиленных балок, что совпало с результатами ранее проведённого компьютерного моделирования [20].

4. Выявлено, что отслоение рубашки от железобетонных балок происходило при нагрузке близкой к разрушающей ($0,93P_{ult}$). Поэтому создание шероховатости на бетонной

поверхности усиленных балок обеспечивает их хорошее сцепление с рубашкой.

5. При появлении трещин в СФБ рубашке эпюра деформаций в нормальном сечении искривляется, что говорит о нарушении гипотезы плоских сечений. Поэтому в случае её использования в расчётных методиках необходимо вводить поправки.

Заключение. С помощью физического эксперимента удалось изучить совместную работу сталефибробетонных (СФБ) рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения. Полученные опытные данные будут использованы при разработке программы физического эксперимента – с целью изучения влияния различных деформационных свойств «старого» бетона конструкции и «нового» сталефибробетона усиления, степени начальной нагрузки усиливаемой балки, а также для разработки методики расчёта и рекомендаций по усилению железобетонных балок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двенадцатый ежегодный статистический отчет по обрушениям от ГЦЭ (с мая 2017 по май 2018) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gce.ru/press/otchet/> (дата обращения 28.03.2019).
2. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) // Materials and Structures. 2014. No 47(3). Pp. 475–491.
3. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behaviour of Ultra –High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars

(RUHPFRC) // International Journal of Fatigue. 2014. No 59. Pp. 145–152.

4. Martín-Sanz H., Chatzi E., Brühwiler E. The use of ultra-high performance fiber reinforced cement-based composites in rehabilitation projects // A Review: dig. of art. 9th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FRAMCOS-9). Berkeley California. 2016. Pp. 221.

5. Hussein L., Amleh L. Structural Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete-Normal Strength Concrete or High Strength Concrete Composite Members // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 1105–1116.

6. Habel K., Denarié E., Bruhwiler E. Experimental Investigation of Composite Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members // ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. Pp. 10–20.

7. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and Repair of RC Beams with Fibre Reinforced Concrete // Cement Concrete Compos. 2010. Vol. 32. Pp. 731–739.

8. Prem P.R., Murthy A.R., Ramesh G., Bharatkumar B.H., Iyer N.R. Flexural Behaviour of Damaged RC Beams Strengthened with Ultra-High Performance Concrete // Advances in Structural Engineering. 2015. Vol. 3. Pp. 2057–2069.

9. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) // Engineering Structures. 2016. Vol. 106. Pp. 370–384.

10. Noshiravani T., Brühwiler E. Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear // ACI Structural Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 251–262.

11. Mohammed T., Abu Bakar B. H., Bunnori, N. M. Torsional Improvement of Reinforced Concrete Beams using Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFC) Jackets –

Experimental Study // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 106. Pp. 533–542.

12. El-Enein H.A., Azimi H., Sennah K., Ghrib F. Flexural strengthening of reinforced concrete slab-column connection using CFRP sheets // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 57. Pp. 126–137.

13. Monti, G., Liotta, M. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear // Construction and Building Materials. 2007. No. 21(4). Pp. 799–809.

14. Rahman S., Molyneaux T., Patnaikuni I. Ultra high performance concrete: recent applications and research // Australian Journal of Civil Engineering. 2005. Vol. 2. No. 1. Pp. 13–20.

15. Graybeal B.A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. McLean, Virginia. 2006. Pp. 176.

16. Graybeal B.A., Baby F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. No. 2. Pp. 113–121.

17. Ahlborn T., Harris D. K. Strength and durability characterization of ultra-high performance concrete under variable curing conditions // In Transportation Research Board Annual Meeting. 2011. Vol. 22. No. 51. Pp. 68–75.

18. Tai Y. S., Pan H. H., Kung Y. N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 7. Pp. 2416–2424.

19. Magureanu C., Sosa I., Negruțiu C., Heghes B. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete // Aci Materials Journal. 2012. No 109(2). Pp. 177–184.

20. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной рубашкой, на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» // Известия КГАСУ. 2017. No. 1. С. 111–120.

Информация об авторах

Радайкин Олег Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». E-mail: olegxxii@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1.

Шарафутдинов Линар Альфредович, аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». E-mail: sh_linar@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1.

Поступила в декабре 2019 г.

© Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А., 2020

*Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: olegxxii@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH STEEL FIBER JACKET

Abstract. The purpose of the study is to experimentally study the joint work of steel fiber reinforced concrete (SFB) reinforcement jacket and reinforced concrete beams at all stages of loading to further develop a methodology for calculating this method of reinforcing bending elements. The main results of the study consist in assessing the strength, stiffness, fracture toughness, as well as the nature of fracture with a picture of the development of cracks for the examined 4 samples (two with a jacket of reinforcement, two – control - without reinforcement). It has been established that the use of SFB jacket with a thickness of 45 mm and with a fiber content percentage of 2,5 % (at a flow rate of 196 kg/m³) increases the breaking load by 20 %, stiffness from 3,4 to 11 times as it is loaded, crack resistance 2,4–2,8 times. The results are compared with computer modeling in ANSYS PC: the discrepancy in the load of crack formation, fracture and deflection values for full-scale samples and a computer model are within 6,3 %, which indicates the reliability of the numerical results and the possibility of using the proposed computer models in further studies on topic of the article.

Keywords: reinforcement, steel fiber reinforced concrete, flexible element, experimental studies, design errors.

REFERENCES

1. Twelfth annual statistical report on collapses from the GCE (from May 2017 to May 2018) [Dvenadcatyj ezhegodnyj statisticheskij otchet po obrusheniyam ot GCE (s maya 2017 po maj 2018)]. URL: <http://www.gce.ru/press/otchet/> (date of treatment: 28.03.2019)
2. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Materials and Structures*. 2014. No. 47(3). Pp. 475–491.
3. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete combined with steel rebars (RUHPFRC). *International Journal of Fatigue*. 2014. No. 59. Pp. 145–152.
4. Martín-Sanz H., Chatzi E., Brühwiler E. The use of ultra-high performance fiber reinforced cement-based composites in rehabilitation projects. A Review: dig. of art. 9th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FRAMCOS-9). Berkeley California. 2016. Pp. 221.
5. Hussein L., Amleh L. Structural Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete-Normal Strength Concrete or High Strength Concrete Composite Members. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. Pp. 1105–1116.
6. Habel K., Denarié E., Bruhwiler E. Experimental Investigation of Composite Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. Pp. 10–20.
7. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and Repair of RC Beams with Fibre Reinforced Concrete. *Cement Concrete Compos.* 2010. Vol. 32. Pp. 731–739.
8. Prem P.R., Murthy A.R., Ramesh G., Bharatkumar B.H., Iyer N.R. Flexural Behaviour of Damaged RC Beams Strengthened with Ultra-High Performance Concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 2057–2069.
9. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Engineering Structures*. 2016. Vol. 106. Pp. 370–384.
10. Noshiravani T., Brühwiler E. Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear. *ACI Structural Journal*. 2013. Vol. 110. Pp. 251–262.
11. Mohammed T., Abu Bakar B.H., Bunnori, N.M. Torsional Improvement of Reinforced Concrete Beams using Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFC) Jackets – Experimental Study. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 106. Pp. 533–542.
12. El-Enein H.A., Azimi H., Sennah K., Ghrib F. Flexural strengthening of reinforced concrete slab-column connection using CFRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 57. Pp. 126–137.
13. Monti, G., Liotta, M. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear. *Construction and Building Materials*. 2007. No. 21(4). Pp. 799–809.
14. Rahman S., Molyneux T., Patnaikuni I. Ultra high performance concrete: recent applications and research. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2005. Vol. 2. No 1. Pp. 13–20.
15. Graybeal B.A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. McLean, Virginia. 2006. Pp. 176.

16.Graybeal B.A., Baby F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. No 2. Pp. 113-121.

17.Ahlborn T., Harris D. K. Strength and durability characterization of ultra-high performance concrete under variable curing conditions. In Transportation Research Board Annual Meeting. 2011. Vol. 22. No. 51. Pp. 68–75.

18.Tai Y.S., Pan H.H., Kung Y.N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 7. Pp. 2416–2424.

19.Magureanu C., Sosa I., Negrutiu C., Heghes B. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete. Aci Materials Journal. 2012. No. 109(2). Pp. 177–184.

20. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. By evaluating the strength, hardness and fracture toughness of bent reinforced-concrete elements, strengthened concrete of steel fiber jacket on the basis of computer modeling in PC «ANSYS» [K ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, usilennyh stalefibrobetonnoj rubashkoj, na osnove komp'yuternogo modelirovaniya v PK «ANSYS»]. News of the KSUAE. 2017. No. 1. Pp. 111–120. (rus)

Information about the authors

Radaykin, Oleg V. PhD, Assistant professor. E-mail: olegxxii@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Sharafutdinov, Linar A. Postgraduate student. E-mail: sh._linar@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45

For citation:

Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. Experimental studies of reinforced concrete beams strengthened with steel fiber jacket. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59

Буланин В.А.

ООО «Инновационные технологии – Энергетика»

E-mail: v_bulanin@mail.ru

ВЫБОР ТИПА ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ В РОССИИ

Аннотация. В различных отраслях экономики, в том числе в системах централизованного теплоснабжения городов и поселений используются преимущественно паротурбинные и газотурбинные тепловые электростанции, работа которых основана на когенерации – преобразовании химической энергии топлива в электрическую и тепловую энергию. При этом значительную часть источников теплоснабжения все еще представляют отопительные котельные, потребляющие при этом электроэнергию на собственные нужды. В газовой отрасли в качестве привода газоперекачивающих установок используются дизельные двигатели. Одним из факторов, сдерживающих организацию комбинированного производства электрической и тепловой энергии на отопительных котельных, является отсутствие производства в России газопоршневых электростанций мощностью более 500 кВт. Применение импортного оборудования для этих целей, как правило, экономически и технологически не оправдано. Согласно приказу Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327 долю импорта газопоршневых и газотурбинных установок предусмотрено сократить с 70 % в 1918 г. до 25 % в 2024 г. Обосновано одно из перспективных направлений создания в России газопоршневых установок – воспроизводство на современной технологической базе двухтактных двигателей, производимых в СССР газопоршневых двигателей серии ГД100 до настоящего времени работающих на ряде объектов. Правительством России рассматривается вопрос перевода на газомоторное топливо магистральных и маневровых тепловозов железнодорожного транспорта. Показано одно из направлений повышения к.п.д. двухтактных двигателей – внутрицилиндровое смешение газа с воздухом с форкамерно-факельным искровым зажиганием.

Ключевые слова: газопоршневой двигатель, когенерация, двухтактный, форкамера, искровое зажигание, утилизация теплоты.

Введение. Теплоснабжение является одной из важных подотраслей жилищно-коммунального хозяйства России. Основой централизованного теплоснабжения является комбинированная выработка электрической и тепловой энергии, которая предусматривает (обеспечивает) повышение эффективности коммунальных систем теплоснабжения малых городов России путем сооружения теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с газотурбинными и газопоршневыми установками [1]. Однако одной из серьезных проблем в России является отсутствие собственного производства газопоршневых двигателей и электростанций на их основе мощностью выше 0,5 МВт для малой теплоэнергетики (и не только для этого).

За 28 лет после распада СССР не были приняты реальные шаги к решению важной государственной задачи – организация производства газопоршневых двигателей и электростанций на их основе. Надежды государства на ее решение действующими в России двигателестроительными предприятиями не оправдались, в связи с чем, например, для модернизации отопительной котельной в теплоэлектростанцию (ТЭЦ) газопоршневые двигатели и электростанции приходится приобретать за рубежом (таблица 1 [2]).

Пунктом 5 «Плана мероприятий...» (шифр отраслевого плана 05ЭМ5) (Приказ Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327) предусмотрено производство газопоршневых установок с двигателями с искровым зажиганием со снижением в 2024 г. доли их импорта до 25 %. Для того чтобы добиться этого показателя необходимо предпринять реальные шаги по созданию в короткие сроки соответствующего производства в России, например, в Белгородской области. Этой задаче соответствует, например, создание газопоршневых электростанций с двигателями единичной средней мощностью 500 - 2000 кВт, которые нужны, в первую очередь, для «обеспечения приоритетного использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для теплоснабжения» (ст. 3 ФЗ «О теплоснабжении»).

«Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года», например, предусмотрено развитие собственной генерации для нужд стационарной энергетики железных дорог на основе газопоршневых электростанций мощностью 1 - 5 МВт. Газопоршневые двигатели применяются и в качестве привода компрессоров на газоперекачивающих станциях.

Таблица 1

Основные зарубежные производители газопоршневых двигателей и электростанций

№ п/п	Страна	Компания	Диапазон мощностей (cosφ = 1,0), кВт
1	США	Caterpillar Inc (включая приобретенные FG Wilson, MWM GmbH, Perkins)	70-6720
2		Cummins Inc	20-2000
3		Waukesha Engine Dresser Inc	65-3480
4	Германия	MAN Diesel & Turbo SE	47-18900
6		MTU Onsite Energy GmbH (Tognum Group)	120-2145
7	Австрия	GE Energy Jenbacher gas engines	300-9500
8	Япония	Mitsubishi Heavy Industries Ltd.	305-5750
9	Великобритания	Rolls Royce Power Engineering Plc (Power Generation)	1190-8550
10	Финляндия	Wartsila Finland Oy	4000-19000
11	Словакия	Elteco a.s. (двигатели - Lombardini, Perkins, Volvo Penta, Iveco, MTU)	6,9-2700
12	Чехия	TEDOM s.r.o.	7-3800
13	Испания	Guascor S.A.	140-1204

В связи с этим задача организации создания таких двигателей является весьма актуальной как для теплоэнергетики, так и для других отраслей экономики России, например, для судовых энергетических установок и тепловозной тяги ОАО «РЖД». <...> Однако на текущий момент чисто газопоршневые двигатели для магистральных тепловозов отечественной промышленностью пока не созданы. Нет разнообразия газопоршневых двигателей и для имеющихся различных модификаций маневровых тепловозов, выпускаемых промышленностью. Сроки создания и освоения производства таких тепловозных двигателей могут составить более 5 лет.... <...> [3].

Газопоршневый двигатель – это двигатель внутреннего сгорания с системой образования топливно-воздушной смеси и искровым зажиганием. В качестве топлива использует природный газ и другие виды газового топлива, что обеспечивает экономичность, высокий ресурс работы и минимальный уровень шума.

Для решения поставленной задачи целесообразно обратиться к недавнему прошлому опыту СССР, согласно которому:

1. Были разработаны, произведены и продолжают до настоящего времени работать в большом количестве двухтактные дизели серии Д100, подтверждая достаточную их надёжность, например:

– 7Д100 – стационарные электростанции на объектах Минобороны РФ;

– 3Д100; 13Д100; 14Д100 – судовые дизельные двигатели;

– 11ГД100 – стационарная газопоршневая электростанция;

– 15Д100 – стационарные электростанции на АЭС;

– 17ГД100 – стационарная газодизельная электростанция;

– 10Д100М – более 5000 ед. в качестве тепловозной тяги в системе ОАО «РЖД». В общей сложности с 1958 по 2007 годы было построено 19 000 секций тепловозов ТЭ10 всех модификаций преимущественно с дизельными двигателями 10Д100 и 10Д100М.

2. По заказу Мингазпрома СССР на основе тепловозного дизель-генератора 2Д100 был разработан и изготовлен в количестве более 170 единиц газовый мотор-генератор 11ГД100М мощностью 1000 кВт до настоящего времени работающий на магистральных газопроводах Бухара-Урал, Средняя Азия-Центр.

Дизели серии Д100 (рис. 1) были созданы в СССР на Харьковском заводе транспортного машиностроения (ХЗТМ), ныне – Завод им. В.А. Малышева, по копии судового двухтактного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) дизеля 38D8½" фирмы «Фербенкс-Морзе» (Fairbanks-Morse, США) (рис. 2), снятого с одного из поставленных по ленд-лизу военныхкатеров.

Основные расчетные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100 представлены в таблице 2.

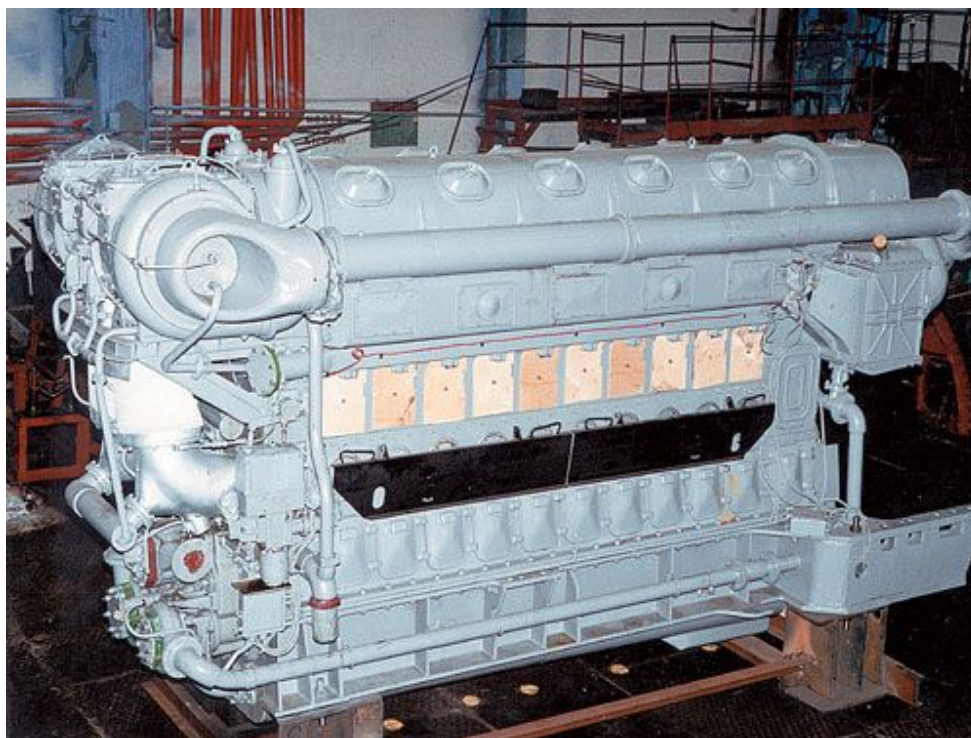
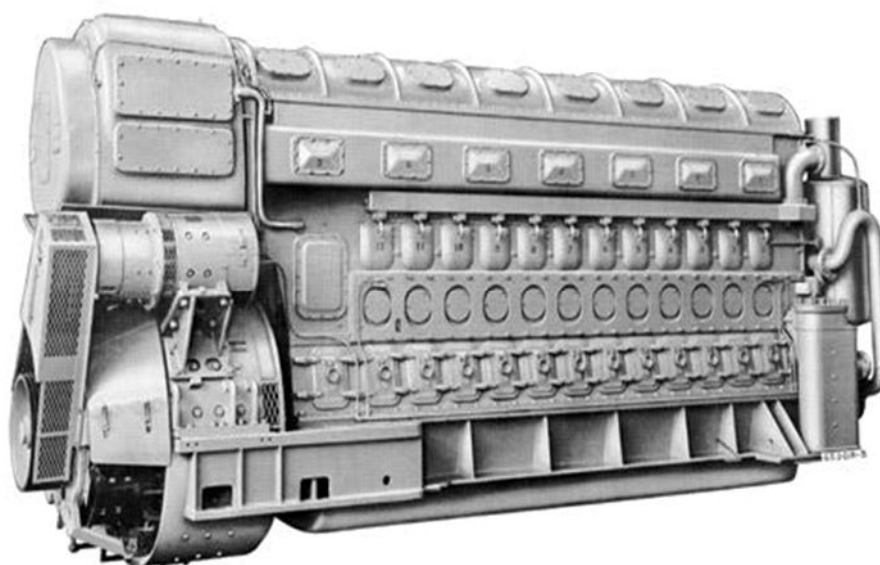


Рис. 1. Тепловозный дизель типа 10Д100М



Область применения в США дизелей типа 38D8 $\frac{1}{8}$ ":

- Атомные электростанции
- Водохозяйственные сооружения
- Морские суда
- Компрессоры природного газа
- Насосные станции
- Больничные учреждения
- Муниципалитеты
- Производство электроэнергии

Рис. 2. Дизель 38D8 $\frac{1}{8}$ " 12-ти цилиндровый с воздухоудвкой

Таблица 2

Основные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100

Объем цилиндра (при перекрытии окон впуска и выпуска), л	14
Количество цилиндров в дизеле, шт.	10
Степень сжатия	14,7
Внутренний диаметр цилиндра, мм	207
Ход оппозитно расположенных поршней, мм	2 x 254

С учетом вышеуказанного опыта выполненных в СССР работ можно путем конвертации, например, тепловозного дизеля 10Д100М мощностью 2200 кВт изготовить газопоршневой двигатель мощностью 2000 кВт (850 об/мин, к.п.д. 40 %) без турбонаддува, так как для сгорания газа требуется меньший в 1,5–2,0 раза избыток воздуха, чем при работе на дизельном топливе. Возможно создание ряда модификаций газового двигателя ГД100 в зависимости от частоты вращения вала и числа цилиндров в нем:

Число цилиндров	Мощность двигателя (кВт) при частоте вращения (об/мин)	
	850	1000
10	2000	2300
6	1200	1400

Одно из прогрессивных направлений в конструкции создаваемых газопоршневых двигателей – форкамерно-факельное зажигание газозоошной смеси в камере сгорания цилиндра двигателя, обеспечивающее повышение надежности и эффективности его работы, а также сокращение вредных выбросов с отработавшими газами в окружающую среду [4–6].

1. Технологические особенности газопоршневой установки на основе двухтактного тепловозного дизеля Д100.

Как было отмечено выше, согласно статье 3 ФЗ «О теплоснабжении» одним из общих принципов организации отношений в сфере теплоснабжения является «обеспечение приоритетного использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для организации теплоснабжения». Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии – режим работы ТЭЦ, при котором производство электрической энергии непосредственно связано с одновременным производством тепловой энергии. В связи с отсутствием паровых и газовых турбин мощностью до 2 МВт на ТЭЦ в небольших поселениях и на промышленных предприятиях целесообразно применять газопоршневые двигатели соответствующей мощности.

Газопоршневые двигатели могут быть как четырехтактными, так и двухтактными. По сравнению с четырехтактными двухтактные газопоршневые двигатели оказались более эффективными, так как они, например, за один оборот совершают в 1,5–2,0 раза большую мощность. В связи с этим автор делает акцент на двигателях такого типа.

В плане решения задачи производства газопоршневых двигателей целесообразно использовать положительный опыт СССР в создании газовых двигателей 11ГД100 на базе дизелей

2Д100. Воспроизводство газопоршневых двигателей (и электростанций на их основе) целесообразно организовать по аналогии (путем конвертации, но на современной технологической основе) с работающими в ОАО «РЖД» двухтактными дизелями серии 10Д100М. Для технического обслуживания дизелей серии Д100 на территории России существует сеть производственных мощностей по их техническому обслуживанию и изготовлению запасных частей и узлов к ним. Таким образом, в целях обеспечения энергетической и экономической безопасности страны, целесообразно возобновление производства газового мотор-генератора 11ГД100М (и / или создание его отечественных аналогов) путем конвертации дизеля 10Д100М на современной технологической основе с использованием ранее приобретенного опыта.

1.1. Особенности конструкции газового двигателя 11ГД100.

В 1908 г. главный инженер Коломенского завода Р.А. Корейво изобрел и построил оригинальный горизонтальный одноцилиндровый двухтактный дизель с расходящимися поршнями. В 1911 г. его выставили на Международной выставке двигателей в Петербурге. Там же депонировался и опытный дизель подобной конструкции Юнкера (Германия). Имеются данные, что немецкий конструктор использовал некоторые особенности двигателя Корейво, но без какого-либо упоминания о нем. Позже дизели с расходящимися (противоположно движущимися) поршнями нашли широкое применение в авиации (бомбардировщики Ю-87). Изготовителем таких дизелей являлась и крупная американская фирма «Фербенкс Морзе» (рис. 2). В СССР это – известный дизель серии Д100 [7].

Создание и внедрение двигателей серии Д100 было осуществлено на базе большого комплекса научно-исследовательских, опытных, конструкторских и проектных работ на экспериментальной одноцилиндровой установке ГД100. В 1957–1960 гг. эти исследования велись в лаборатории двигателей Академии наук СССР.

Большая часть работ проводилась совместно ВНИИгазом (г.Москва) и заводом им. Малышева (г.Харьков).

Основные научно-исследовательские работы проводились во ВНИИгазе на экспериментальной одноцилиндровой установке, изготовленной заводом им. Малышева: исследования по отработке рабочего процесса, по системам питания, пуска и зажигания газовых двигателей ГД100. Полученные на основе этих работ рекомендации проверялись на заводских опытных двигателях.

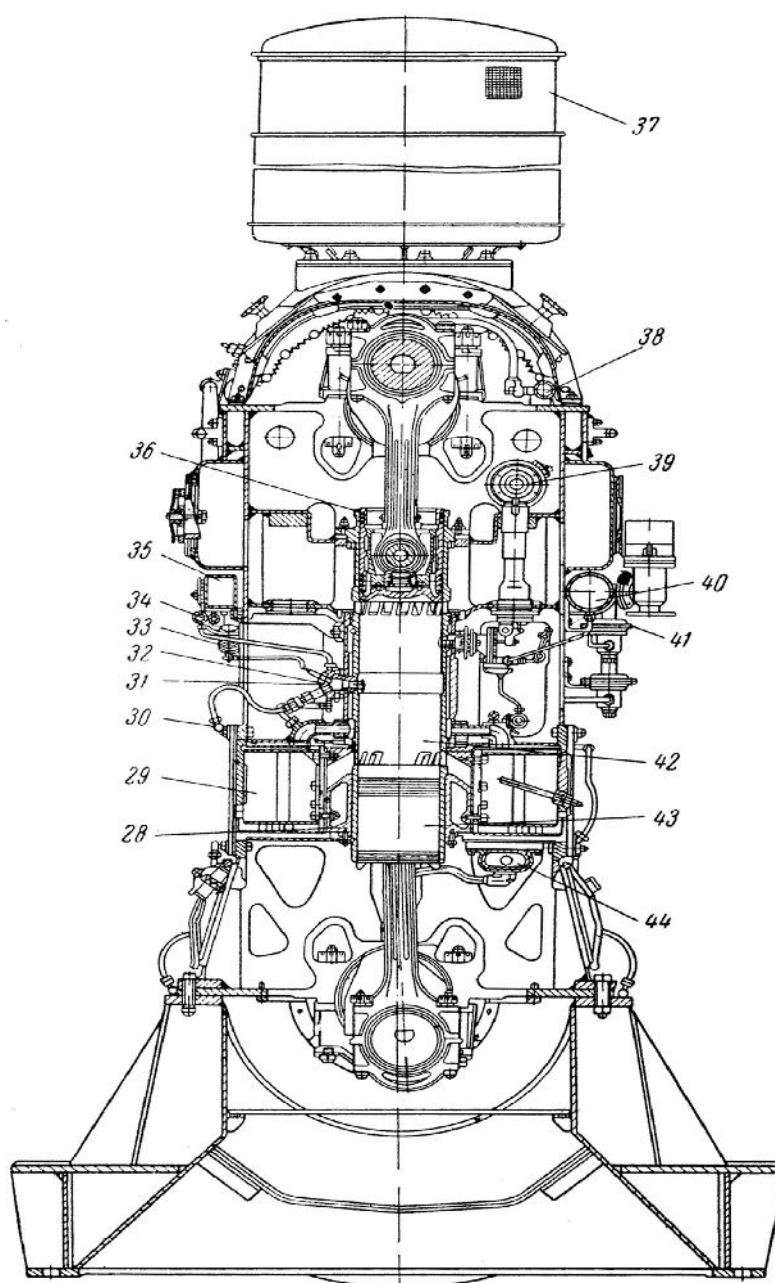


Рис. 3.а Газовый двигатель 11ГД100. Поперечный разрез [6]

(Двигатель рядный, двухтактный со встречно движущимися поршнями, форкамерно-факельным зажиганием с внутренним смесеобразованием).

28 – выхлопная коробка; 29 – выхлопной коллектор;

30 – коллектор форкамерного газа; 31 – форкамера с автоматическим клапаном; 32 – свеча зажигания;

33 – катушка зажигания; 34 – коллектор отвода воды от форкамер; 35 – коллектор отвода воды из

цилиндров; 36 – верхний поршень; 37 – глушитель шума; 38 – верхний масляный коллектор;

39 – кулачковый вал; 40 – коллектор цилиндрического газа; 41 – пусковой редуктор; 42 – цилиндр;

43 – нижний поршень; 44 – нижний масляный коллектор

Значительное число мотор-генераторов 11ГД100М до настоящего времени находятся в эксплуатации, что свидетельствует об их достаточной надежности и экономичности.

В газовых двигателях ГД100 осуществлен высокоэффективный рабочий процесс с форкамерно-факельным зажиганием, высокой степенью сжатия при обедненных и сверхобедненных топливовоздушных смесях.

Система подачи газа у газовых двигателей серии ГД100 включает в себя газовые клапаны с дозатором и по одной форкамере с автоматическим клапаном на каждом цилиндре, автоматические диафрагменные редукторы с пневматическими командными головками форкамерного и пускового газа, а также пусковой газовый клапан с пневматической командной головкой.

Эксплуатация подтвердила значительные преимущества газовых двигателей ГД100 перед дизелями Д100, на базе которых они строятся, в отношении износостойкости, долговечности, срока службы и расхода масла. Резкое уменьшение износов основных деталей и практическое отсутствие нагара позволило вдвое увеличить сроки службы между техническими осмотрами и ремонтами, а сроки службы масла увеличить в 3–4 раза. Все это указывает на целесообразность применения газовых двигателей ГД100 не только в газовой промышленности, но и в других отраслях экономики Российской Федерации, в первую очередь в системах теплоснабжения.



Рис. 3.б. Табличка мотор-генератора 11ГД100 М

Все производители создают газопоршневые установки на основе дизельных двигателей. В частности, в 1960-ые годы по заказу Мингазпрома СССР ВНИИГАЗ на основе тепловозного рядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) 10-ти цилиндрового дизеля 2Д100 разработал газопоршневую установку типа 11ГД100 [6, рис. 107] (см. рис. 3. а), а с 1963 г. Харьковский завод им. В.А. Малышева начал выпуск газовых мотор-генераторов 11ГД100М рис. 3.б), оснащенных двухтактными газовыми двигателями мощностью 1500 л.с. при частоте вращения 750 об/мин.

В книге [6] достаточно подробно описаны результаты этих исследований, устройство и характеристики газовых двигателей ГД100 и агрегатов на их базе, а также данные эксплуатации мотор-генераторов 11ГД100М на газопроводе Бухара–Урал. Приведены особенности конструкции и технического обслуживания этих двигателей. Особое внимание было уделено форкамерно-факельному зажиганию газозвоздушной смеси в камере сгорания двигателя.

1.2. Форкамерно-факельное искровое зажигание. ЛАГ-процесс.

Доктор технических наук Л.А. Гуссак (Институт химической физики АН СССР) открыл явление высокой химической активности продук-

тов неполного сгорания, образующихся при горении смеси углеводородов с воздухом богатого состава, в которой для полного сгорания не хватает приблизительно 50 % кислорода. Это явление по имени автора получило название ЛАГ-процесс.

Госкомитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий внес это открытие в Государственный реестр открытий СССР (Приоритет открытия – октябрь 1952 г. Диплом № 142. Заявка № ОТ-8628): «Л.А. ГУССАК. «Явление высокой химической активности продуктов не полного сгорания богатой углеводородной смеси. Формула открытия. Установлено неизвестное ранее явление высокой химической активности продуктов неполного сгорания, обусловленное образованием сверхравновесной концентрации химически активных частиц (свободных атомов и радикалов) при сгорании богатой углеводородной смеси».

Как было обнаружено, при горении предельно богатой горючей смеси, кроме стабильных продуктов неполного сгорания, образуется значительная, на 2–4 порядка выше равновесной, концентрация химически весьма активных свободных атомов (H) и радикалов (CH₃ и др.), несмотря на значительное (на 400–800 °K) снижение температуры. Такие химически активные частицы, обладающие высокой скоростью турбулентной диффузии, инициируют быстрые, почти сплошь разветвленные химические реакции, и тем самым обеспечивают резкое сокращение периода задержки воспламенения рабочей смеси.

На этой основе разработаны новый принцип процесса лавинной активации горения и способ форкамерно-факельного инициирования и стабилизации горения, применение которых в камерах сгорания двигателей, в силовых и тепловых устройствах значительно повышает их технико-экономические показатели.

Подробное описание ЛАГ-процесса дано в статье Л.А. Гуссак [10] (рис. 4). Теория ЛАГ-процесса и его применение в двигателях внутреннего сгорания защищены авторскими свидетельствами СССР, советскими патентами в США, Англии, Франции, Италии, ФРГ, Японии и других странах.

Искровой разряд воспламеняет богатую ($\alpha_{\text{ф}} = 0,4\text{--}0,7$) топливную смесь в форкамере (объем которой составляет 2–3 % объема камеры сгорания). Проходя через узкие перепускные каналы, фронт пламени гаснет. В камере сгорания поток продуктов сгорания, содержащий активные атомы и радикалы, становится завихренным. При этом образуются многочисленные турбулизированные очаги горения. Они воспламеняют рабочую газозвоздушную смесь ($\alpha_{\text{к}} = 0,91\text{--}2,00$) в камере сгорания. Цифрами (рис. 4) обозначена

последовательность распространения фронта пламени в форкамере и зон горения в камере сгорания.

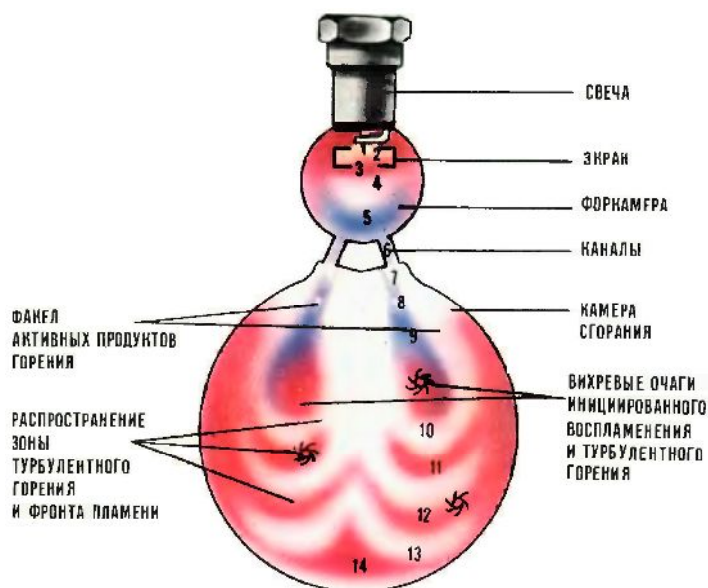


Рис. 4. Схема процесса лавинной активации горений (ЛАГ-процесса) в форкамерном двигателе [8]

2. Пути создания газопоршневой установки на базе двухтактного дизеля.

2.1. Этапы создания модифицированной газопоршневой установки.

Создание газопоршневой установки на основе тепловозного однорядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) двухтактного дизеля 10Д100 и его модификаций следует начать с выполнения соответствующего инвестиционного проекта. Инвестиционный проект предусматривает выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКР и ТР) в три этапа:

1. Изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую установку мощностью 1100–2000 кВт.

2. Создание стенда на основе базового образца однорядного оппозитного среднеоборотного дизеля типа 10Д100, проведение исследований по усовершенствованию системы управления подачей и воспламенения топлива (природного газа) с последующей, на основании полученных результатов, модернизацией дизеля в газопоршневую установку, проведением режимно-наладочных и балансовых опытов и комплексных испытаний с нагрузками 1100–2000 кВт.

3. Выполнение технологических работ с постановкой на производство газопоршневой установки мощностью 1100–2000 кВт на основе дизеля 10Д100М и его модификаций.

Основное внимание автора при выполнении НИОКР было уделено способам подвода природного газа в цилиндр и его смесеобразованию с воздухом, а также оптимизации форкамерно-факельной системы зажигания смеси газ-воздух в камере сгорания.

На рис. 5 показана схема работы гильзы цилиндра дизеля 10Д100. Дизтопливо в камеру сгорания подается через напротив расположенные в центре гильзы цилиндра две форсунки, после сжатия воздуха (при сближении поршней в зоне камеры сгорания), что обеспечивает оптимальные условия для перемешивания топлива с воздухом, его воспламенения и горения.

В газовом двигателе 11ГД100М (рис. 6), наоборот, природный газ подается через одно верхнее сопловое отверстие в момент перекрытия поршнями впускных и выпускных окон. Наддув воздуха – одноступенчатый.

2.2. Цель и задачи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Тема НИОКР: Создание стенда на основе базового образца однорядного оппозитного среднеоборотного газопоршневого двигателя 0ГД100 на основе дизеля типа 10Д100, проведение исследований по усовершенствованию системы управления подачей и воспламенения при-

родного газа с последующей, на основании полученных результатов, модернизацией дизеля 10Д100М в газопоршневую установку, проведением режимно-наладочных и балансовых опытов и комплексных испытаний с нагрузками 1100-2000 кВт.

2.2.1. Первый этап выполнения НИОКР

Цель 1-го этапа НИОКР: изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую установку мощностью 1100-2000 кВт.

Задачи исследований на 1-ом этапе НИОКР:

- изучение конструкции и анализ результатов конвертации тепловозного дизеля 2Д100 в газовый двигатель 11ГД100 [6];
- изучение результатов исследования по обработке рабочего процесса, по системам питания, пуска и зажигания газовых двигателей ГД100; проработка систем внутреннего смесеобразования газа с воздухом и зажигания смеси для конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую уста-

новку мощностью 1100-2000 кВт; изучение особенностей форкамерно-факельного зажигания и анализ опыта его применения в двигателях внутреннего сгорания;

- проведение патентных исследований по газопоршневым двигателям с форкамерно-факельным зажиганием топливно-воздушной смеси.

Результаты выполненного первого этапа НИОКР.

1-ый этап НИОКР был выполнен по собственной инициативе за счет собственных средств ООО «ИТ-Энергетика». С учетом проведенной работы и, в частности, рекомендаций [6], были приняты следующие основные технические решения по созданию газопоршневого двигателя на основе дизеля 10Д100:

- в связи с тем, что при работе на газе требуется меньший избыток воздуха, чем на дизтопливе, турбонаддув в двигателе не предусмотрен;
- для оптимизации режима сгорания природного газа последний подается в цилиндр через встречно расположенные по центру гильзы сопловые отверстия (рис. 6). Для повышения мощности двигателя до 1600–2000 кВт необходимо соответственно увеличить расход газа без увеличения расхода воздуха в камеру сгорания.

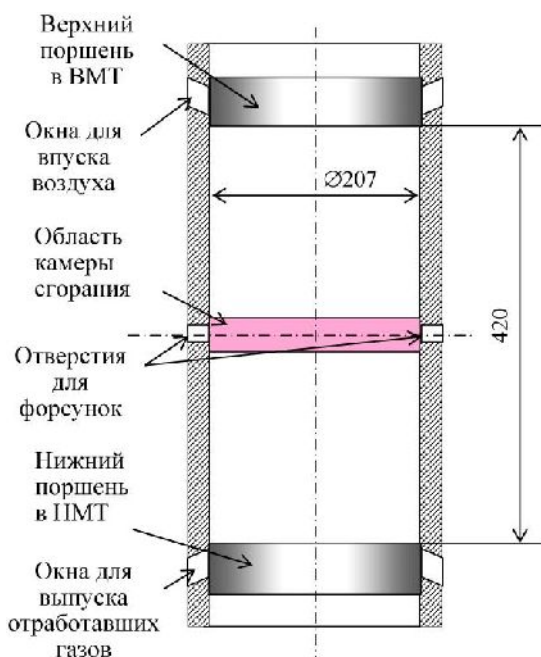


Рис. 5. Основные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100

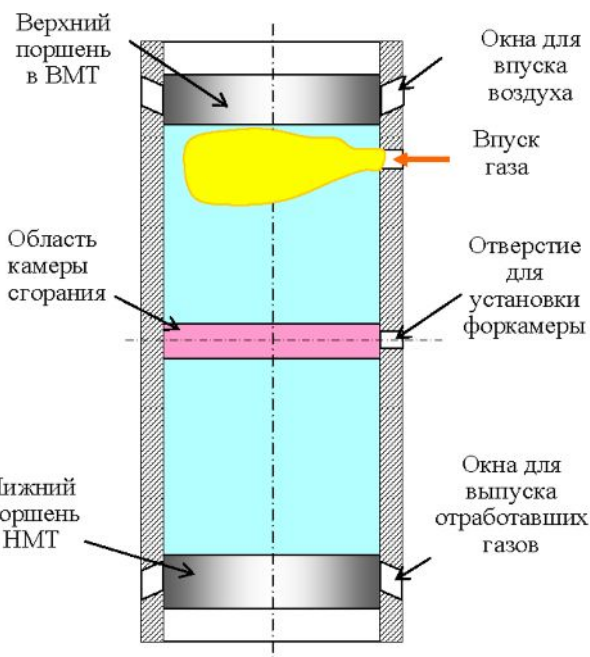


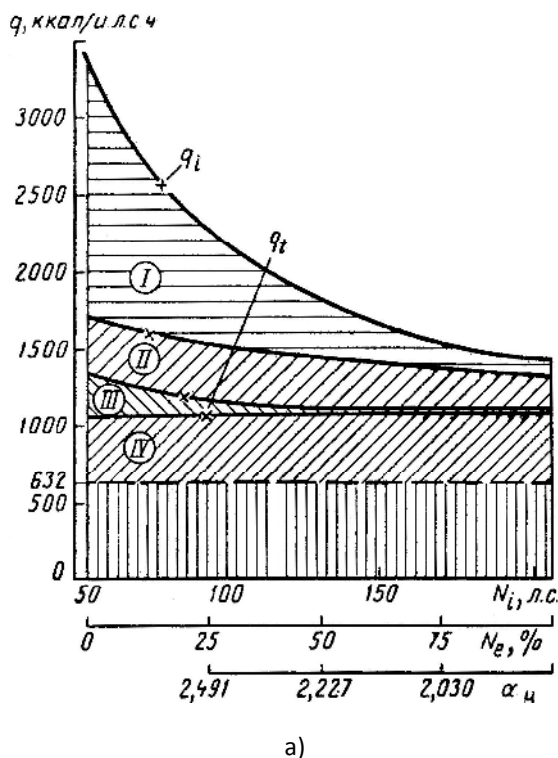
Рис. 6. Схема впуска газа в гильзу цилиндра 11ГД100 (ВНИИГАЗ)

Результаты выполненного 1-го этапа НИОКР показали, что на основе тепловозного двигателя 10Д100М мощностью 2200 кВт может быть создана газопоршневая установка (без турбонаддува) мощностью до 2000 кВт. Особое внимание при выполнении НИОКР было уделено особенностям конструкции и условий работы системы форкамерно-факельного зажигания смеси

газ-воздух с учетом проведенных ВНИИГАЗ исследований [6].

Так как базовая технология перевода двигателя Д100 для работы на газе была разработана более 50 лет назад и, естественно, не учитывает многих достижений современной науки и техники, при доработке отдельных узлов и систем

двигателя 10Д100М и отладке на специализированном стенде в режиме газового двигателя могут быть достигнуты, в сравнении с двигателем 11ГД100М, более высокие показатели, как по мощности, сроку службы, так и по к.п.д.



а)

Было установлено, что двигатели 11ГД100 при прочих положительных качествах имеют и недостаток – пониженный к.п.д. преимущественно за счет недогорания природного газа в цилиндрах (рис. 7, I).

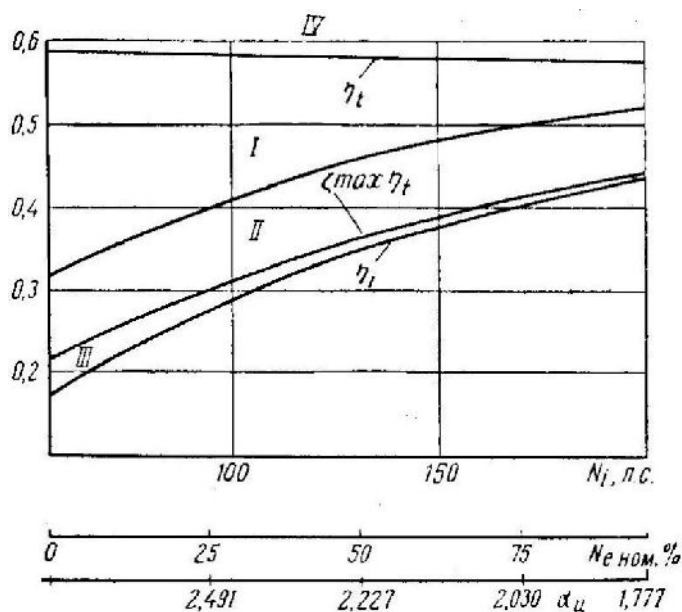


Рис. 7. Энергетические характеристики газопоршневого двигателя 11ГД100 [5]

а) внутренний тепловой баланс газового двигателя 11ГД100 [6, рис. 85];

б) к.п.д. и потери рабочего процесса в газовом двигателе 11ГД100 [6, рис. 86].

I – потери вследствие недогорания; II – потери вследствие теплопередачи при сгорании;

III – потери вследствие несвоевременности выделения тепла; IV – термодинамические (неустраняемые) потери

Основными причинами больших значений недогорания природного газа в двигателе 11ГД100 при пониженных нагрузках являются:

- большие избытки воздуха в цилиндре ($\alpha_{ц} > 1,8$);

- односторонний (в верхнюю часть цилиндра) впуск порции природного газа (рис. 6), вследствие чего не обеспечиваются оптимальные условия для его перемешивания с воздухом при сжатии перед сгоранием;

- недостаточность одной форкамеры для повышения эффективности сгорания газа.

По результатам проведенных НИР ООО «ИТ – Энергетика» предложило альтернативный вариант для устранения этого недостатка – двухсторонний впуск газа по центру гильзы цилиндра через форкамеры (рис. 8), обеспечивающий более эффективное смешение газа с меньшим избытком воздуха и, как следствие, более полное его сгорание. Все газообразное топливо проходит через форкамеру, а в цилиндр поступает чистый

воздух. Небольшая часть топлива остается в форкамере, большая часть перетекает в цилиндр. [6; 8; 9].

При избытке воздуха $\alpha_{ц} = 1,777$ [6] достигается мощность в одном цилиндре 200 л.с. (147 кВт), для десяти цилиндров – 1470 кВт, что подтверждает принципиальную возможность увеличения мощности мотор-генератора до 2000 кВт, например, за счет уменьшения избытка воздуха ниже $\alpha_{ц} = 1,777$ и повышения частоты вращения вала с 750 до 1000 об/мин. Данные расчеты требуют экспериментальной проверки и подтверждения.

На основании выполненных расчетов и анализа особенностей процесса горения метана в цилиндре двигателя при мощности 1600-2000 кВт на клеммах генератора достигается к.п.д. более 40 %. Такие показатели подтверждаются результатами испытаний, проведенными ВНИИГАЗом на одноцилиндровом отсеке ОГД100 на режиме двигателя 11ГД100 [6].

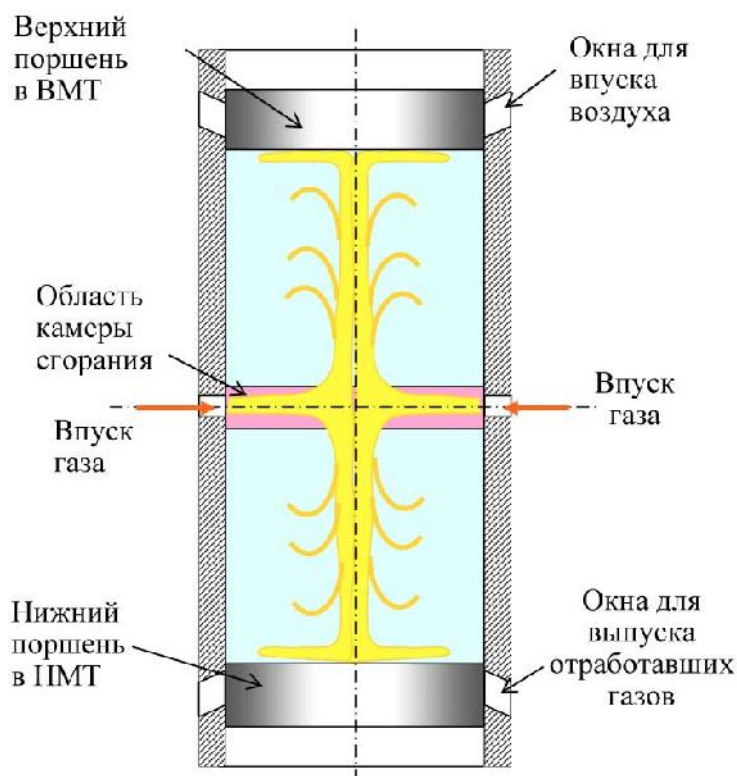


Рис. 8. Вариант подачи газа в гильзу цилиндра

Ведущие специалисты ООО «Инновационные технологии – Энергетика» с участием и под руководством автора с 2005 года занимаясь данной тематикой, в частности, обеспечили строительство «под ключ» на «Валуйском комбинате растительных масел» (Белгородская обл.) электростанции с газопоршневыми установками 11ГД100, конвертированными из дизельных двигателей 7Д100М, ранее созданных по заказу Минобороны СССР (рис. 9).

С 2013 года работы по созданию модернизированной газопоршневой установки 11ГД100 были возобновлены, но уже на основе тепловозных дизелей 10Д100, в частности, в 2014 году по собственной инициативе и за счет собственных средств был выполнен 1-ый этап НИОКР: «Изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 (рис. 2) в газопоршневую установку мощностью 1100-2000 кВт».

Целесообразно использовать этот опыт (объединив его научный и производственный потенциал с АО «ВНИИЖТ», ООО «ЛокоТех-Промсервис», БГТУ им. В.Г. Шухова) и на его основе, например, тепловозный дизель 10Д100М конвертировать в газопоршневые двигатели ГД100 мощностью 1000 - 2000 кВт, предварительно выполнив научно-исследовательские, опытно-кон-

структорские и технологические работы на одноцилиндровом газопоршневом отсеке ОГД100 и на 10-ти цилиндровом двигателе ГД100.

2.2.2. Второй этап выполнения НИОКР.

Цель: Создание действующего образца газопоршневой установки мощностью 1100-2000 кВт на основе дизеля 10Д100 с проведение исследований и экспериментальных испытаний.

Проведение второго этапа НИОКР целесообразно выполнить в период 2020–2021 гг.

Задачи исследований на 2-ом этапе НИОКР:

1. Разработка опытно-конструкторской и технической документации для изготовления и монтажа систем подачи газа в цилиндры, форкамер газопоршневой установки, создаваемой на основе дизеля 10Д100 с разработкой модели внутреннего смесеобразования газа с воздухом и процесса сгорания топлива при различной степени наддува воздуха.

2. Приобретение одноцилиндрового отсека ОД100 и проведения на нём экспериментальных проверок полученных результатов и корректировки по полученным результатам ранее разработанной документации.

3. Создание стенда десятицилиндрового газового двигателя мощностью 1100 – 2000 кВт для проведения экспериментальных исследований целесообразно, например, на одном из крупнейших промышленных предприятий городского округа Белгород: ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ».



Рис. 9. Газопоршневой мотор-генератор 11ГД100 мощностью 1000 кВт, конвертированный из дизель-генератора 7Д100М

4. Проведение комплексных экспериментальных исследований газового двигателя мощностью 1100 – 2000 кВт полученных результатов и корректировки ранее разработанной документации по полученным результатам.

5. Разработка программы и технического задания для постановки на производство газопоршневой установки мощностью 1100-2000 кВт на основе дизеля 10Д100 и его модификаций. Газопоршневая электростанция ГД100 мощностью 1000 – 2000 кВт будет создана с соблюдением требований ГОСТ 15.101-98, ГОСТ Р 55006-2012, ГОСТ Р 55007-2012, ГОСТ Р 15.301-2016, ГОСТ 15.016-2016.

2.2.3. План создания газопоршневой установки мощностью 1100–2000 кВт.

Как было показано в работе [3] сроки создания и освоения производства, например, газопоршневых тепловозных двигателей могут составить более 5 лет.

Для включения в реестр инвестиционных проектов последние должны соответствовать «Правилам и критериям отбора инвестиционных

проектов» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30.12.2015 № 1516 (ред. от 16.08.2018).

Инвестиционный проект «Создание газопоршневой установки мощностью 1100–2000 кВт на основе двухтактного рядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) среднеоборотного тепловозного дизеля типа 10Д100 (10Д20,7/2х25,4) мощностью 2200 кВт (750, 850, 1000 об/мин)» должен соответствовать критериям установленным пунктом 5 «Правил предоставления субсидий из федерального бюджета...», утвержденных постановлением Правительства РФ от 12.12.2019 № 1649.

Предложенная концепция производства газопоршневых двигателей получила поддержку ведущих организаций, например, входящих в структуру ОАО «РЖД», в том числе ООО «Локо-Тех-Промсервис» и АО «ВНИИЖТ».

Выводы. Основой централизованного теплоснабжения поселений является комбинированное производство электрической и тепловой энергии не только на паротурбинных и газотурбинных, но и на газопоршневых электростанциях

мощностью до 25 МВт с газопоршневыми установками единичной мощностью более 500 кВт. Однако в России, как для электростанций, так и для компрессорных установок в системах газоснабжения, применяются дизельные и газопоршневые двигатели зарубежных производителей, что отрицательно влияет на экономику страны.

Газопоршневые двигатели и электростанции на их основе требуются не только для источников теплоснабжения, но и для нефтегазовой отрасли, ОАО «РЖД», так и для других отраслей экономики России. Определена одна из важнейших задач – создание производства в России газопоршневых двигателей и электростанций на их основе, например, в Белгородской области с учетом имеющегося накопленного опыта.

Исследования показали перспективность применения для этих целей двухтактных, в том числе оппозитных (со встречно движущимися поршнями) газопоршневых установок.

Показаны пути выхода из создавшейся ситуации с воспроизводством газопоршневых двигателей серии ГД100 с форкамерно-факельным зажиганием газозооушной смеси в камере сгорания цилиндра двигателя на современной технологической основе [4; 5] с учетом опыта производства до распада СССР и эксплуатации газопоршневых электростанций 11ГД100М, созданных на базе тепловозных дизелей 2Д100 [6]. При этом для целей теплоснабжения может использоваться теплота отработавших в двигателях газов с температурой до 400°С.

Исследования конструктивных характеристик, режимов работы и опыта эксплуатации двигателя 11ГД100М выявили перспективные возможности его усовершенствования, которые позволят повысить экономичность и экологичность его работы.

Показано, что предложенные направления разработки газопоршневых двигателей работы соответствуют Плану мероприятий по импортозамещению (Приказ Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327).

Исследования предложено продолжить и довести до постановки на производство газопоршневых двигателей мощностью 1100-2000 кВт в Белгородской области с участием, например, ООО «Инновационные технологии – Энергетика», БГТУ им. В.Г. Шухова и ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ».

Информация об авторах

Буланин Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, Генеральный директор ООО «Инновационные технологии – Энергетика». E-mail: v_bulanin@mail.ru. Россия, 308007, г Белгород, ул. Мичурина, 56.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев Ю.Е., Дубинин А.Б., Вдовенко И.А. Повышение эффективности коммунальных систем теплоснабжения малых городов России путем сооружения ТЭЦ с газотурбинными и газопоршневыми установками // *Новости теплоснабжения*. 2013. №11 (159). С. 6–8.
2. Алексахина Л.И., Курочкин Д.С., Михеев Д.В., Шабалин И.С. Анализ российского рынка когенерационных технологий на базе газопоршневых установок // *Транспортное дело России*. 2013. №6 (109). Ч. 2. С. 197–201.
3. Колесников В.И., Мартынюк И.В. О научных разработках в области применения газовых систем для тяговых двигателей на железнодорожном транспорте // *Бюллетень Объединенного Ученого Совета ОАО «РЖД»*. 2017. № 5-6. С. 1–5.
4. Slefarski R., Golebiewski M., Czyzewski P., Grzymislawski P., Wawrzyniak J. Wawrzyniak. Analysis of combustion process in industrial gas engine with prechamber-based ignition system. *Open Access Journal «Energies»*. Basel, Switzerland. 2018. 11. 336 p.
5. Ashish Shah. Improving the efficiency of gas engines using pre-chamber. Ignition doctoral thesis (electronic version: <https://pdfs.semanticscholar.org/dac7/c482893ba3049f15f87b1f2d8df73415894.pdf>). Division of combustion engines department of energy sciences. Sweden, December 2015. 74 p.
6. Генкин К.И., Аксенов Д.Т., Струнге Б.Н. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе // *Л., Недра*, 1970. 328 с.
7. Балабин В.Н. На путях созидания (к 100-летию коломенских дизелей) // *«Локомотив»*. Ежемесячный массовый производственный журнал. 2003. № 4 (556). С. 42–47.
8. Морозов К.А. О некоторых особенностях регулирования состава смеси в форкамере двухтактного газового двигателя. *Труды Института двигателей АН СССР*, 1962. Вып. 6, С. 5–17.
9. Соболев Л.М. Основы смесеобразования в двигателях форкамерно-факельным зажиганием. *Костромской сельскохозяйственный институт*. Выпуск 14, 1967. 257 с.
10. Гуссак Л.А. Полуостров взрывного горения // *Химия и жизнь*. 1974. № 6. С. 33–40.

Поступила в декабре 2019 г.

©Буланин В.А., 2020

Bulanin V.A.

LLC «Innovative technologies – Energy»

E-mail: v_bulanin@mail.ru

CHOOSING THE TYPE OF GAS PISTON INSTALLATIONS FOR HEAT AND GAS SUPPLY IN RUSSIA

Abstract. In various sectors of the economy, including district heating systems in cities and settlements, steam turbine and gas turbine thermal power plants are mainly used. Their operation is based on cogeneration, which is the conversion of chemical fuel energy into electrical and thermal energy. At the same time, a significant part of the heat supply sources are still represented by heating boilers, which consume electricity for their own needs. In the gas industry, diesel engines are used as the drive for gas pumping plants. One of the factors hindering the organization of combined production of electric and thermal energy in heating boilers is the lack of production in Russia of gas-piston power plants with a capacity of more than 500 kW. The use of imported equipment for these purposes is usually not economically and technologically justified. According to the order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated 16.04.2019 No. 1327, the share of imports of gas piston and gas turbine units is planned to be reduced from 70 % in 1918 to 25 % in 2024. One of the promising directions of creating gas piston installations in Russia is justified: reproduction on a modern technological basis of two-stroke engines produced in the USSR of GD100 series gas piston engines that are still working at a number of facilities. The Russian government is considering converting mainline and shunting locomotives of railway transport to gas-powered fuel. One of the ways of increasing the efficiency of two-stroke engines is shown-in-cylinder mixing of gas with air with pre-chamber-flare spark ignition.

Keywords: gas piston engine, cogeneration, two-stroke, pre-chamber, spark ignition, heat recovery.

REFERENCES

1. Nikolaev Yu.E., Dubinin A.B., Vdovenko I.A. Improving the efficiency of municipal heat supply systems in small cities of Russia by building a thermal power plant with gas turbine and gas piston installations [Povyshenie effektivnosti kommunal'nyh sistem teplosnabzheniya mal'nyh gorodov Rossii putem sooruzheniya TEC s gazoturbinnyimi i gazoporshnevnyimi ustanovkami]. Heat supply news. 2013. No. 11 (159). Pp. 6–8. (rus)
2. Aleksahina L.I., Kurochkin D.S., Miheev D.V., SHabalin I.S. Analysis of the Russian market of cogeneration technologies based on gas-piston installations [Analiz rossijskogo rynka kogeneracionnyh tekhnologij na baze gazoporshnevnyh ustanovok]. Transport business of Russia. 2013. No. 6 (109). Part 2. Pp. 197–201. (rus)
3. Kolesnikov V.I., Martynyuk I.V. About scientific developments in the field of application of gas systems for traction engines on railway transport [O nauchnykh razrabotkakh v oblasti primeneniya gazovykh sistem dlya tyagovykh dvigateley na zheleznodorozhnom transporte]. Bulletin of the joint Scientific Council of Open society «RZHD». 2017. No. 5-6. Pp. 1–15. (rus)
4. Slefarski R., Gołebiewski M., Czyzewski P., Grzymisławski P., Wawrzyniak J. Analysis of combustion process in industrial gas engine with pre-chamber-based ignition system. Open Access Journal «Energies». Basel, Switzerland. 2018. 11. 336 p.
5. Ashish Shah. Improving the efficiency of gas engines using pre-chamber. Ignition doctoral thesis (electronic version: <https://pdfs.semanticscholar.org/dac7/c482893ba3049f15f87bf1f2d8df73415894.pdf>). Division of combustion engines department of energy sciences. Sweden, December 2015. 74 p.
6. Genkin K.I., Aksenov D.T., Strunge B.N. GD100 Gas engines and units based on them [Gazovye dvigateli GD100 i agregaty na ih baze]. L., Nedra, 1970. 328 p. (rus)
7. Balabin V.N. On the ways of creation (to the 100th anniversary of Kolomna diesels) [Na putyah sozidaniya (k 100-letiyu kolomenskih dizelej)]. «Locomotive». Monthly mass production magazine, No. 4 (556), 2003. Pp. 42–47. (rus)
8. Morozov K.A. On some features of the mixture composition regulation in the two-stroke gas engine pre-chamber. Proceedings of the Institute of engines of the USSR Academy of Sciences [O nekotoryh osobennostyah regulirovaniya sostava smesi v forkamere dvuhtaktnogo gazovogo dvigatelya]. Vol. 6, 1962. (rus)
9. Sobolev L.M.. Fundamentals of mixture formation in engines with pre-chamber-flare ignition. Kostromskoj sel'skohozyajstvennyj institut. Vypusk 14 [Osnovy smeseobrazovaniya v dvigatelyah forkamerno-fakel'nym zazhiganiem]. 1967. 257 p. (rus)
10. Gussak L.A. Peninsula of explosive combustion [Poluostrov vzryvnogo goreniya. Zhurnal «Himiya i zhizn'»]. Chemistry and life. 1974. No. 6. Pp.33–40. (rus)

Information about the authors

Bulanin, Vladimir. A. PhD, General Director LLC «Innovative technologies – Energy». E-mail: v_bulanin@mail.ru. Russia, 308007, Belgorod, st. Michurina, 56.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Буланин В.А. Выбор типа газопоршневых установок для тепло- и газоснабжения в России // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 46–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59

For citation:

Bulanin V.A. Choosing the type of gas piston installations for heat and gas supply in Russia. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 46–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-60-67

Плотников А.С.

Тюменский индустриальный университет

E-mail: plotnikovas@tyuiu.ru

РАЗНОКОНТУРНАЯ УСТАНОВКА УЗЛОВ КРЫШНЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

Аннотация. Крышные котельные установки (ККУ) являются важнейшей составляющей развития генерации тепла в системе ЖКХ. Они представляют собой инженерное сооружение, расположенное на кровле объекта капитального строительства, вырабатывающее тепловую энергию для потребления одного или ограниченного числа потребителей, связанных между собой на организационно-правовой основе или технологической потребностью. Основная проблема эксплуатации ККУ – процессы передачи энергии колебаний на объекты потребления тепловой энергии, что в последствии выражается в негативном воздействии шума и вибрации на человека внутри эксплуатируемых помещений. Причинами возникающих процессов служат: процессы перемещения рабочих тел в механизмах, связанных с получением тепловой энергии; передача энергии колебаний по строительным конструкциям; жёсткие связи строительных конструкций; ошибки в проектировании инженерных мероприятий. В вопросах виброакустической защиты выделены следующие основные методы снижения воздействий: борьба со структурным шумом; снижение энергии колебаний от ККУ; снижение аэрационного шума; шумоизоляция технического этажа под ККУ. Одним из способов снижения воздействия является установка «плавающего пола» в источнике вибрации. Данный метод применяется при необходимости снижения вибрации от инженерного оборудования на строительные конструкции. Недостаток существующего метода расчета «плавающего пола» состоит в том, что оборудование котельной имеет разные частоты собственных и вынужденных колебаний, при этом находясь на одной усредненной строительной конструкции пола, что не позволяет нивелировать негативный эффект передачи вибрации в полной мере. Автором представлены результаты доработки метода с выделением отдельных контуров «плавающего пола» при применении ККУ в гражданских зданиях монолитно-каркасного исполнения.

Ключевые слова: крышные котельные установки, колебания, вибрация, монолитно-каркасные здания.

Введение. В статье представлен материал по исследованию методов снижения шума в гражданских зданиях, оборудованных крышными котельными установками.

В настоящее время обеспечение объектов капитального строительства устойчивым снабжением тепловой энергии [1] без уменьшения полезной площади здания в климатических условиях Российской Федерации [2] приводит к росту числа крышных котельных установок, как основного источника теплоснабжения.

Исследуемый объект – 19-этажное жилое здание, построенное по технологии монолитно-каркасного домостроения оборудованное крышной котельной. Отличительная черта монолитно-каркасного домостроения – создание ядра жесткости в виде лестнично-лифтового узла. Основная несущая способность каркаса обеспечивается совместной работой металлической арматуры (металл) и сделанных из бетона элементов. Используемые материалы хорошо воспринимают воздействие вибрации, которую с минимальными потерями передаются по всему ядру здания, а затем транслируют на другие строительные конструкции.

Вопросами борьбы с негативным воздействием от инженерного оборудования (шум и вибрация) занимаются крупные научные объединения НИИСФ РААСН, НИИ МЭИ, ТГАСУ, СНИУ имени Академика С.П. Королева, ОмГТУ, ТИУ и ученые В.П. Гусев [3], С.Н. Овсянников [4, 5], Б.А. Калашников [6], В.Г. Соколов [7], В.Б. Тупов [8], М.Н. Чекардовский [9] и другие [10].

Цель статьи – совершенствование существующих методов снижения показателей шума и вибрации на примере метода «плавающего пола» [11] для применения в автономных источниках теплоснабжения как на стадии проекта, так и в эксплуатационный период.

Цель исследования. получение модели работы «плавающего пола» при устройстве двух различных контуров в одном автономном источнике теплоснабжения (АИТ) – крышной котельной.

Задачи исследований:

– инструментальные измерения уровня и частоты собственных и вынужденных виброакустических колебаний (УЧСВВАК) узлов ККУ без «плавающего пола»;

– моделирование уровня и частоты собственных и вынужденных виброакустических колебаний (УЧСВВАК) узлов ККУ с применением «плавающего пола»

– моделирование процессов передачи виброакустического воздействия на здание;

– расчет «плавающего» пола для применения в крышной котельной;

– теоретическая оценка и прогнозирование состояния системы «ККУ - плавающий пол - здание».

Основная часть. Силы, действующие на здание, как на механическую систему, весьма разнообразны по ролю, которую они играют в процессе передачи вибрации и шума [12,13,14] (колебательном процессе). Наиболее значимыми являются:

– Восстанавливающие силы. Основной тип восстанавливающих сил – сила упругости.

– Диссипативные силы. При колебаниях механических систем, кроме восстанавливающих сил, неизбежно развиваются силы трения. Они совершают необратимую работу, что приводит к рассеиванию механической энергии (диссипации). К этой категории относятся силы трения в опорах и сочленениях механической системы, силы сопротивления среды, в которой происходят колебания, силы внутреннего трения в материале элементов системы и силы, возникающие при нагружении амортизаторов.

Представленная на рис. 1 общая механическая система крышной котельной, состоит из элементов с разными характеристиками массы и величины колебаний. Элементы системы представлены на рис. 1.

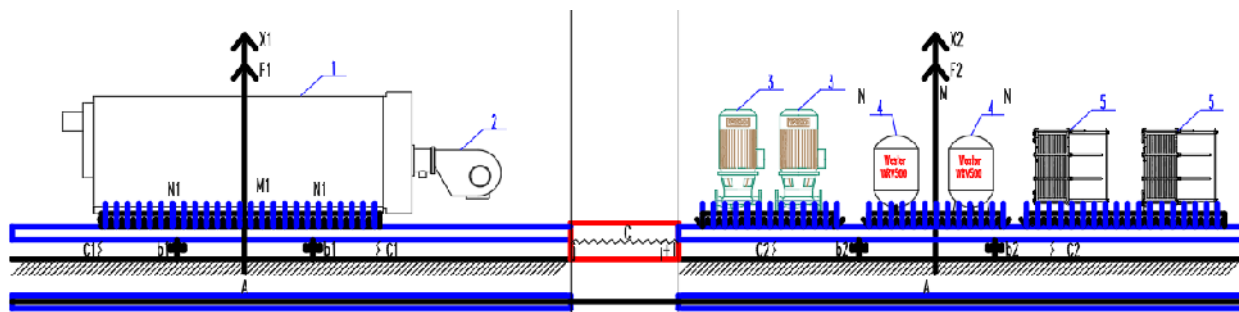


Рис. 1. Механическая система колебаний, где 1 – котельная установка; 2 – горелочное устройство; 3 – насосная техника; 4 – расширительные баки; 5 – теплообменные аппараты; М – масса элемента в механической системе, кг; N – продольная сила элемента в механической системе, Н; с – коэффициент жесткости демпфирующего основания (пружины) котельной, Н/м или кг/с²; b – коэффициент кинематической вязкости основания, м²/с; x – перемещение (колебания) основания котельной, м; F – вектор колебания системы, с⁻¹; где, с₀ – приведенный коэффициент жесткости системы при частоте p_i

Согласно способу разложения масс [15] в некоторых точках системы сосредоточены разные массы m_i. Тогда собственная частота такой системы p:

$$p^i = \sqrt{\frac{c^i}{m_i}} \quad (1)$$

Для усреднения собственных колебаний сложной механической системы необходимо ввести понятие приведенной массы m (кг):

$$m = \frac{c_0}{c} m_i \quad (2)$$

Применение данного выражения позволяет нивелировать разные массы тел с различными показателями колебания в сложной механической системе.

Таким образом, при наличии тел разной массы и нахождение показателя общей приведенной массы в сложной системе, представленной на рис. 1 можно представить в виде:

Для распределенной массы:

$$m_o = c_0 \int_0^l \frac{m(x)dx}{c(x)} \quad (3)$$

Для сосредоточенной массы:

$$m_o = \frac{c_0}{c_1} m_1 + \frac{c_0}{c_2} m_2; \quad (4)$$

Разделив обе части полученного равенства на показатель приведенного коэффициента жесткости (с₀):

$$m_o : c_0 = 1 : p^2 \quad (5)$$

где p² – квадрат частоты приведенной системы. Полученное выражение будет приближено к формуле Донкерлея:

Для сосредоточенной массы:

$$\frac{1}{p^2} = \frac{1}{p_1^2} + \frac{1}{p_2^2} \quad (6)$$

Для распределенной массы:

$$\frac{1}{p^2} = \int_0^l \frac{m(x)dx}{c(x)} \quad (7)$$

где, $c(x)$ – коэффициент жесткости системы, Н/м или кг/с².

Исходя из описанной выше системы необходимо описать колебания контуров котельной.

Для расчета нескольких контуров применим известные положения расчета «плавающего пола» по методике Профессора В.П. Гусева [3].

Конструктивная схема основания крышной котельной без «плавающего пола» представлена на рис. 2.

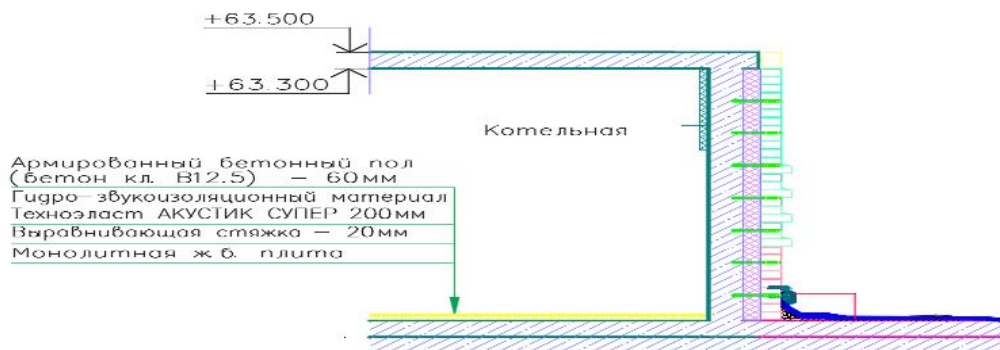


Рис. 2. Основание котельной

Для снижения вибропередачи от источников на строительные конструкции и друг друга выполнено устройство демпфирующего элемента для применения в системе «плавающего пола» (рис. 3).

Расположение демпфирующих элементов выполнено по периметру котельной и между контурами плавающего пола (рис. 4).

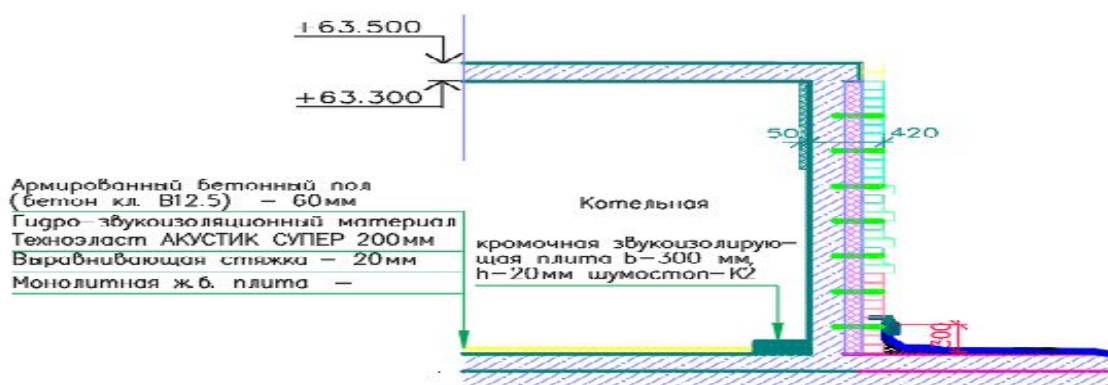


Рис. 3. Демпфирующий элемент в системе «плавающий пол»

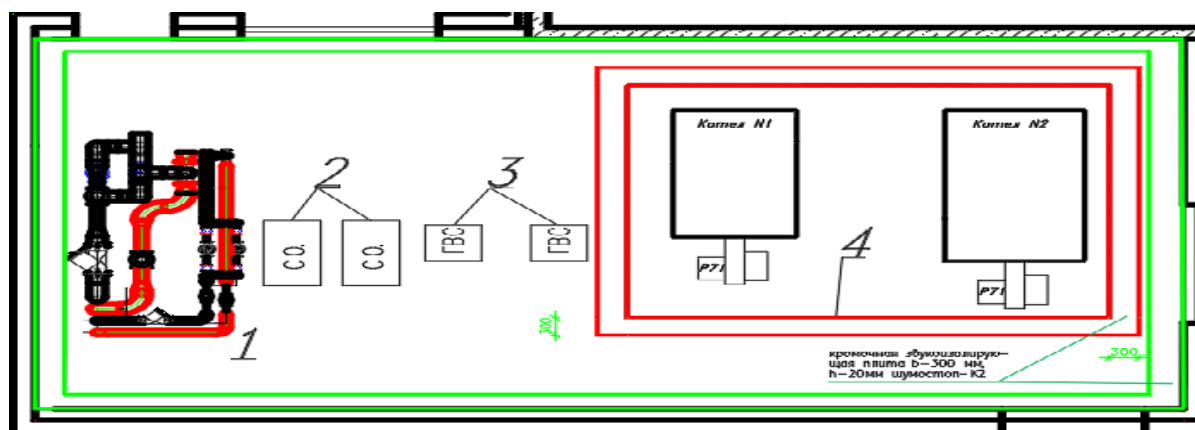


Рис. 4. Система применения по периметру здания котельной системы «плавающий пол»

1 – блок циркуляционных насосов системы теплоснабжения и ГВС здания; 2,3 – теплообменные аппараты; 4 – котельные установки с горелочными устройствами и обвязкой

Существующие методы.

Оценка уровня работы «плавающего пола»:

$$\Delta V = \Delta V_n + 10 \lg \left(\frac{\left(1 + \frac{R_m}{Z_n}\right)^2 + \left(\frac{X_m}{Z_n}\right)^2}{\left(1 + \frac{R_m}{Z_n}\right)^2 + \left(\frac{X_m}{Z_n}\right)^2} \right), \text{дБ} \quad (8)$$

где, Z_n, Z_n , н·с/м – сопротивления плиты перекрытия и покрытия пола на упругом основании; R_m, X_m , н·с/м – действительная и мнимая части сопротивления оборудования крышной котельной; ΔV_n , дБ – уровень виброгашения конструкции плавающего пола;

$$\Delta V_n = 40 \lg \frac{f}{f_0}, \text{при } 2f_0 \leq f < f_6 \quad (9)$$

$$\Delta V_n = 20 \lg \frac{f}{f_0} + \frac{10 \lg m_n}{m_0} - 3, \text{при } f \geq f_6 \quad (10)$$

где, f_6 , Гц – частота наступления волновых явлений в упругом основании; f , Гц – частота распространения колебаний; m_0 , кг/м² – поверхностная плотность упругого основания.

Наиболее важной характеристикой «плавающего пола», является частота собственных колебаний, Гц:

$$f_0 = 0,16 \sqrt{\frac{E_d}{dm_n}}, \quad (11)$$

где, E_d , МПа – динамический модуль упругости основания «плавающего пола»; d , м – толщина упругого основания в обжатом состоянии; m_n , кг/м² – поверхностная плотность плиты пола.

Изменение уровня вибрации до и после устройства плавающего пола представлены на рис. 4 и 5.

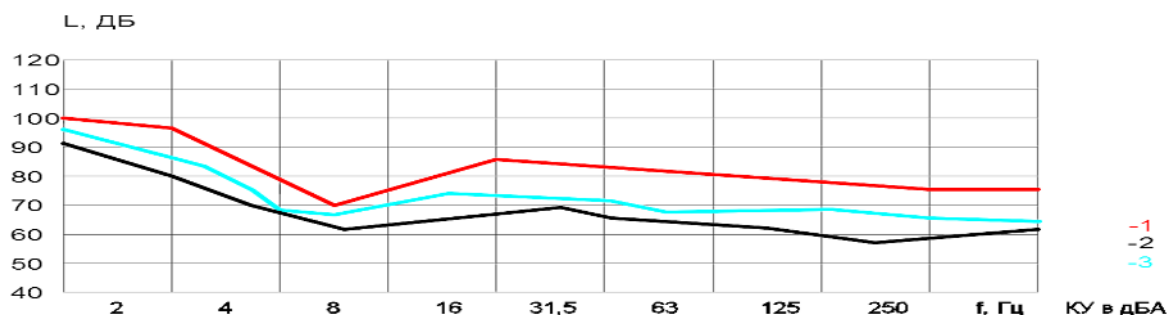


Рис. 4. Уровни вибрации до устройства плавающего пола

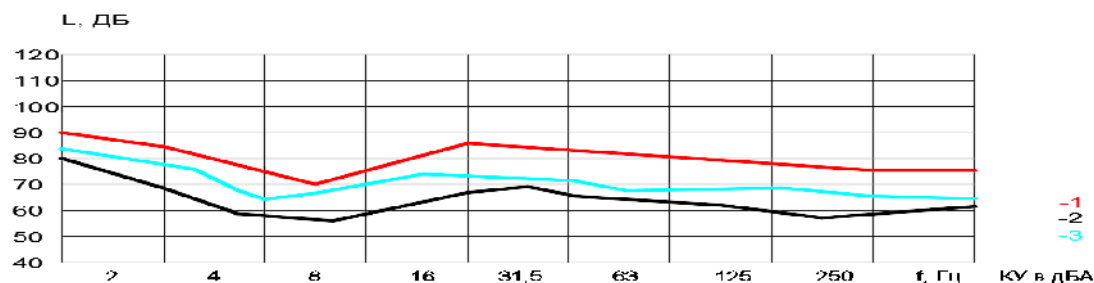


Рис. 5. Уровни вибрации после устройства плавающего пола

1 – вибрация на конструкциях котельной; 2 – на основании котельной; 3 – на кровле

Анализ графиков 4 и 5 показывает снижение уровня вибрации в котельной до и после устройства плавающего пола на 10 %. Помимо контроля за показателями шума в котельной дополнительно проведены измерения уровня шума в тех-

ническом этаже, жилых помещениях под котельной и дополнительно зафиксированы фоновые показатели шума 19-этажного жилого здания. Результат измерений до появления «плавающего пола» представлены на рис. 6.

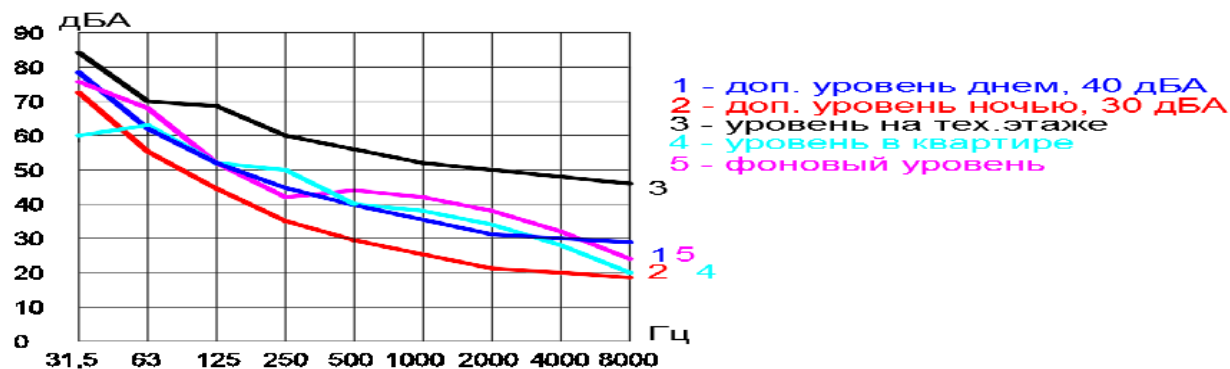


Рис. 6. Уровень шума в помещениях 19-этажного жилого здания

После анализа полученных данных был предложен метод «плавающего пола» для вибро-

акустической защиты здания от воздействия котельной. Результат после появления плавающего пола представлен на рис. 7.

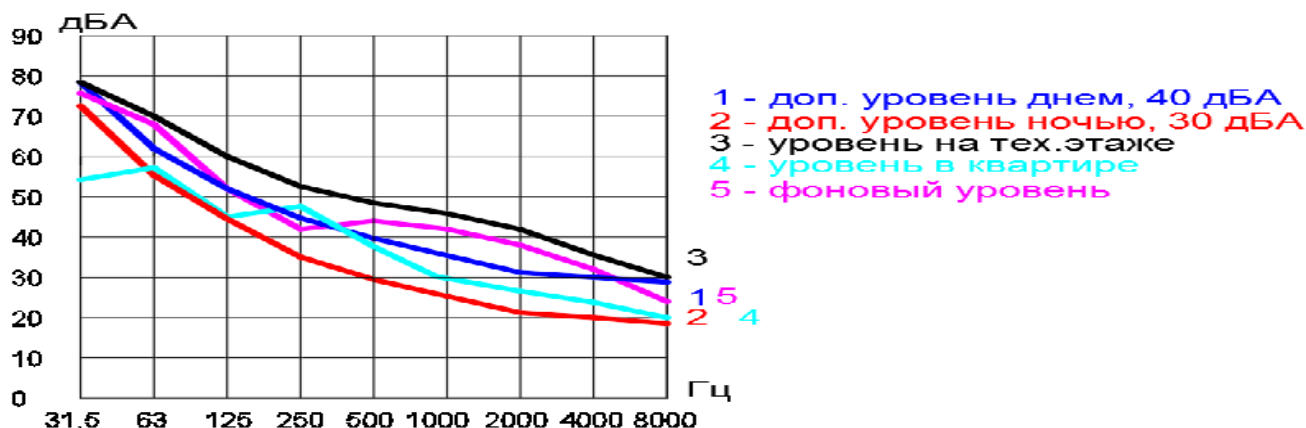


Рис. 7. Уровень шума в помещениях 19 этажного жилого здания после устройства «плавающего пола»

Согласно данным рисунками мы видим превышение уровня звука в диапазоне 125–500 Гц [16]. Данные частоты соответствуют громкости процесса горения в котельных установках.

Оценка уровня «работы» контура №1 «плавающего пола»:

$$\Delta V_1 = \Delta V_{n1} + 10 \lg \left(\frac{(1 + \frac{R_{m1}}{Z_n})^2 + (\frac{X_{m1}}{Z_n})^2}{(1 + \frac{R_{m1}}{Z_n})^2 + (\frac{X_{m1}}{Z_n})^2} \right), \text{дБ} \quad (12)$$

Оценка уровня «работы» контура №2 «плавающего пола»:

$$\Delta V_2 = \Delta V_{n2} + 10 \lg \left(\frac{(1 + \frac{R_{m2}}{Z_n})^2 + (\frac{X_{m2}}{Z_n})^2}{(1 + \frac{R_{m2}}{Z_n})^2 + (\frac{X_{m2}}{Z_n})^2} \right), \text{дБ} \quad (13)$$

где, Z_n , Z_n , н·с/м – сопротивления плиты перекрытия и покрытия пола на упругом основании; R_m , X_m , н·с/м – действительная и мнимая части сопротивления оборудования крышной котельной; ΔV_n , дБ – уровень виброгашения (работы) конструкции плавающего пола;

$$\Delta V_n = 40 \lg \frac{f}{f_0}, \text{ при } 2f_0 \leq f < f_6 \quad (14)$$

$$\Delta V_n = 20 \lg \frac{f}{f_0} + \frac{10 \lg m_n}{m_0} - 3, \text{ при } f \geq f_6 \quad (15)$$

где, f_0 , Гц – частота наступления волновых явлений в упругом основании; f , Гц – частота распространения колебаний; m_0 , кг/м² – поверхностная плотность упругого основания.

Наиболее важной характеристикой «плавающего пола», является частота собственных колебаний, Гц:

$$f_0 = 0,16 \sqrt{\frac{E_d}{dm_n}}, \quad (16)$$

где E_d , МПа – динамический модуль упругости основания «плавающего пола»; d , м – толщина

упругого основания в обжатом состоянии; m_n , кг/м² – поверхностная плотность плиты пола.

Передачу энергии между демпферами контурами «плавающего пола» опишем по известной методике [17] через потерю мощности при передаче энергии вибрации между энергетическими системами:

$$P_i^b \text{ diss} = \omega \cdot \eta_i^b \cdot W_i^b \quad (17)$$

где η_i^b , рад/с – коэффициент внутренних потерь в подсистеме при распространении изгибных волн; ω – круговая частота; W_i^b , Дж – средняя энергия колебания в элементе.

Тогда, энергетическая взаимосвязь систем:

$$P_{ij}^{bl} - P_{ji}^{lb} = \omega \cdot \eta_{ij}^{bl} \cdot \eta_i^b \left(\frac{W_i^b}{\eta_i^b} \right) - \left(\frac{W_j^l}{\eta_j^l} \right) \quad (18)$$

Внутренние потери энергии при реверберации в помещениях можно представить, как зависимости объема помещения и звукопоглощения:

$$\eta_k^a = \frac{2,2}{f \cdot T_k} = 13,5 \cdot \frac{A_k}{f V_k} \quad (19)$$

где f , Гц – среднегеометрическая полоса частоты; T_k , с – время реверберации в помещении; A_k , дБ – эквивалентное звукопоглощение материалов в помещении; V_k , м³ – объем помещения.

Результаты:

- Внедрение нескольких контуров «плавающего пола» снижает уровень вибрации на 10 %;
- Анализ графика (рисунок 7) демонстрирует снижение уровня шума на 12 %;
- Анализ применения нескольких контуров плавающего пола в крышной котельной позволяет локально снизить вибрацию от работающего оборудования.

Выводы:

1. Система «плавающего пола» необходима для обеспечения виброакустической защиты жилых зданий с инженерным оборудованием крышных котельных.

2. Разложение механической системы, состоящей из тел разной массы позволяет достоверно оценить «вклад» каждой системы в виброакустический уровень здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утр. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р / Институт энергетической стратегии. [электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 20.04.2019).
2. О ситуации с теплоснабжением в РФ: отчет // Фонд энергетического развития. 2016 г. Москва. URL: <http://www.energosovet.ru/stat880.html> (15.04.2018).
3. Гусев В.П. Из опыта борьбы с шумом оборудования инженерных систем // АВОК. 2012. № 3. С. 64–76.
4. Лелюга О.В., Овсянников С.Н., Шубин И.Л. Исследование звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций с учетом структурной звукопередачи // Бюллетень Строительной техники. Москва: БСТ. 2018. №7 (1007). С. 39–43.
5. Овсянников С.Н., Лымарева Е.А. Исследование распространения структурного шума на моделях фрагментов здания // Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: сб. материалов V Всероссийской научно-практической конференции. 2015. С. 340–348.
6. Калашников Б.А., Рассказова Н.Н. Влияние массы объекта на частотные характеристики при поддержании постоянства его положения // Омский научный вестник. 2011. №2 (100). С. 134.
7. Соколов В.Г., Дмитриев А.В. Свободные колебания подземных прямолинейных участков тонкостенных участков газопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2019. №2 (73). С.29–34.
8. Тупов В.Б. Снижение шума от объектов большой и малой энергетики // Доклады V Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: Айсинг, 2015. С. 55–64.
9. Чекардовский М.Н., Илюхин К.Н., Чекардовский С.М. Методы контроля и диагностики // Мегапаскаль. 2009. №3. С. 18.
10. Bottega W.J. Engineering Vibrations (Taylor & Francis Group, 2015)
11. Свод Правил «51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)» от 20.05.2011. М.: Минстрой России, 2017.
12. Fernando B., Trombetta Z.P.H., Noise Control Engineering Journal. 2015. Vol. 63. No.1
13. Ermann M., Wiley J., Architectural Acoustics (John Wiley & Sons Inc, 2017)
14. Brown, Alan Lex, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise. 2016. 16. Pp. 550–556.
15. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1967.
16. Plotnikov A., Zhilina T. Criteria of choosing buildings structures for rooftop boiler rooms, 4th international young researches conference on youth, science, solutions: ideas and prospects. 2018. 17. 01010.
17. Овчинников С.Н. Распространение структурного звука в гражданских зданиях: дис. ... д-р техн. наук: 05.23.01. Томск, 2001.

Информация об авторах

Плотников Артём Сергеевич, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: plotnikovas@tyuiu.ru. Тюменский индустриальный университет. Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38.

Поступила в августе 2019 г.

© Плотников А.С., 2020

Plotnikov A.S.

Industrial University of Tyumen

E-mail: plotnikovas@tyuiu.ru

**MULTI-CONTOURED INSTALLATION OF ROOF BOILER PLANTS NODES
IN CIVIL BUILDINGS**

Abstract. *Roof boiler plants are the crucial components in development of heat generation within housing and utilities sector. They are given as engineering structures located on the roof of a construction project generating thermal energy for one or a limited number of consumers, interconnected on a legal basis or by*

process requirements. The main problem of roof boiler plant operation is the processes of vibrational energy transmission to the objects of thermal energy consumption. Subsequently it results in negative impact of noise and vibration on person inside the building. The reasons for these processes are: the processes of moving working bodies in mechanisms associated with the production of heat energy; the transfer of energy of vibrations through building structures; rigid connections of building structures; errors in the design of engineering measures. In terms of vibroacoustic protection, the following main methods of reducing impacts are identified: fighting structural noise; reducing the energy of vibrations from the roof boiler plants; reducing aeration noise; noise insulation of the technical floor under the roof boiler plants. One way to reduce the impact is to install a "floating floor" in the vibration source. This method is used when it is necessary to reduce vibration from engineering equipment on building structures. Disadvantage of the existing method for calculating "the floating floor" is that boiler plant equipment has various frequencies of natural and induced vibrations while being on the same averaged building floor structure. This does not allow mitigating the negative effect of vibration transfer to the full extent. The author presents results of further improvement of the method with the allocation of separate circuits of "the floating floor" when using roof boiler plants in civil buildings of cast-in-place construction.

Keywords: Roof boiler plants, fluctuations, vibration, monolith-frame buildings

REFERENCES

1. Energy strategy of Russia for the period until 2030. Morning. By order of the Government of the Russian Federation [Energeticheskaya strategii Rossii na period do 2030 g. Utr. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 13.11.2009 g.] dated November 13, 2009 No. 1715-r / Institute for Energy Strategy. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 04/20/2019)
2. On the situation with heat supply in the Russian Federation: report [O situacii s teplosnabzheniem v RF: otchet]. Energy Development Fund. 2016 Moscow. URL: <http://www.energoso- vet.ru/stat880.html> (04/15/2018)
3. Gusev V.P. From the experience of dealing with noise of equipment of engineering systems [Iz opyta bor'by s shumom oborudovaniya inzhenernyh sistem]. ABOK. 2012. No. 3. Pp. 64–76 (rus)
4. Lelyuga O.V., Ovsyannikov S.N., Shubin I.L. Research of sound insulation of internal fencing constructions taking into account structural sound transfer [Issledovanie zvukoizolyacii vnutrennih ogra- zhdayushchih konstrukcij s uchetom strukturnoj zvukoperedachi]. Bulletin of Construction Equipment. Moscow: BST. 2018. No7 (1007). Pp. 39–43 (rus)
5. Ovsyannikov S. N., Lymareva E. A. Research of the distribution of structural noise on models of buildings fragments [Issledovanie rasprostraneniya strukturnogo shuma na modelyah fragmentov zdaniya]. Investments, construction, and real estate as a material basis for modernization and innovative development of the economy: coll. materials of the V All-Russian scientific-practical conference. 2015. Pp. 340–348 (rus)
6. Kalashnikov B.A., Rasskazova N.N. Influence of the object's mass on frequency characteristics while maintaining the constability of its position [Vliyanie massy ob'ekta na chastotnye harakteristiki pri podderzhanii postoyanstva ego polozheniya]. Omsk Scientific Herald. 2011. No. 2 (100). P. 134. (rus)
7. Sokolov V.G., Dmitriev A.V. Free oscillations of straight thin walled underground pipelines [Svobodnye kolebaniya podzemnyh pryamolinejnyh uchastkov tonkostennyh uchastkov gazoprovodov]. Bulletin of civil engineers. 2019. No.2 (73) Pp. 29–34. (rus)
8. Tupov V.B. Decrease in noise from objects of large and small energy [Snizhenie shuma ot ob'ektov bol'shoj i maloj energetiki]. Doklady V Vseros. Scientific practical conf. SPb.: Iceing, 2015. Pp. 55–64. (rus)
9. Chekardovskiy M.N., Ilyukhin K.N., Chekardovskiy S.M. Monitoring and diagnostic methods [Metody kontrolya i diagnostiki]. Megapascal. 2009. No. 3. P. 18 (rus)
10. Bottega W.J., Engineering Vibrations (Taylor & Francis Group, 2015)
11. Code of Practice «51.13330.2011 Noise protection. The updated version of SNiP 23-03-2003 (with Amendment No. 1)» dated 05/20/2011. M: Ministry of Construction of Russia, 2017.
12. Fernando B., Trombetta Z.P.H., Noise Control Engineering Journal. 2015. Vol. 63. No.1
13. Ermann M., Wiley J., Architectural Acoustics (John Wiley & Sons Inc, 2017)
14. Brown, Alan Lex, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise. 2016. Vol. 16. Pp 550-556
15. Panovko Y.G. Fundamentals of the applied theory of elastic vibrations [Osnovy prikladnoj teorii uprugih kolebanij]. M: Mechanical engineering, 1967. (rus)
16. Plotnikov A., Zhilina T. 4th international young researchers conference on youth, science, solutions: ideas and prospects, YSSIP. 2017. 17. 01010
17. Ovchinnikov S.N. Distribution of structural sound in civil buildings [Rasprostranenie strukturnogo zvuka v grazhdanskikh zdaniyah]: dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.23.01. Tomsk, 2001. (rus)

Information about the authors

Plotnikov, Artyom S. Senior lecturer. E-mail: plotnikovas@tyuiu.ru. Industrial University of Tyumen. Russia, 625000, Tyumen, st. Volodarskogo, 38.

Received in August 2019

Для цитирования:

Плотников А.С. Разноконтурная установка узлов крышных котельных установок гражданских зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 60–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-60-67

For citation:

Plotnikov A.S. Multi-contoured installation of roof boiler plants nodes in civil buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 60–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-60-67

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-68-75

Маркушев С.О.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: s.markushev@inbox.ru

ИЕРАРХИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ РАЗНОГО МАСШТАБА В СТРУКТУРЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Аннотация. В статье рассмотрена градостроительная структура исторического центра Санкт-Петербурга как иерархия ансамблей. Градостроительные ансамблевые композиции в исследовании систематизируются вне зависимости от их масштаба. Во введении представлена основная проблематика восприятия центра города как системы взаимосвязанных друг с другом ансамблей. Предложен краткий обзор актуальных исследований, отечественных и зарубежных, затрагивающих вопросы изучения композиционно-пространственного устройства городской структуры. Рассмотрен план Леблона 1717 года в качестве примера целостного градостроительного ансамбля. Особенности сложившихся иерархических взаимосвязей прослежены на примере одной вертикальной связи: композиция исторического центра, композиция Адмиралтейско-Московской стороны, композиция Пятилущия Адмиралтейства, композиция Невского проспекта, композиция Казанского собора. Для наглядности, текстовое описание дополнено рисунком, иллюстрирующим характер иерархических взаимоотношений композиций. Разработана 5-уровневая иерархическая модель среды исторического центра Санкт-Петербурга, которая представлена в виде таблицы с указанием масштаба каждого из уровней. Характеристика целостности предложена в качестве обоснования группировки ансамблей по уровням. В качестве выводов предложены особенности иерархии градостроительных композиций исторического центра Санкт-Петербурга: многоуровневость, вертикальная взаимосвязанность, диапазон масштаба, тотальность распространения, неравномерность распространения, планомерность исторического развития.

Ключевые слова: градостроительная структура, исторический центр Санкт-Петербурга, ансамбль, градостроительная композиция, масштаб, целостность

Введение. На территории Санкт-Петербурга десятки тысяч исторических зданий, существенная часть которых (а именно, 8974 объекта в границах города по данным Комитета по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры на 20.01.2020) имеет статус объекта культурного наследия или выявленного объекта культурного наследия, обладает авторской архитектурой и стилем. Поэтому очень часто исторический центр как целое представляют в виде ряда выдающихся ансамблей, расположенных среди бесчисленной стилистически разрозненной фоновой застройки. В результате, для характеристики исторической среды распространено использование грубо упрощенного двухмерного описания «ансамбль – фон».

Петербург выделяется на фоне остальных городов как феномен, выдающиеся качества которого подтверждает включение единого ландшафта его агломерации и исторического центра в список объектов ЮНЕСКО. Как целостный компонент, ансамбль исторического центра Санкт-Петербурга должно характеризовать одно из важнейших качеств ансамбля – упорядоченная соподчиненность всех объектов друг другу. Проявить такую особенность можно за счет ком-

плексного исследования, рассматривающего разнообразные по типологии и масштабу объекты ансамбли в составе единой иерархии.

Большинство современных исследований в области изучения исторической архитектурно-градостроительной структуры центра Санкт-Петербурга посвящены вопросам истории и теории архитектуры (Б.М. Кириков, М.С. Штиглиц, Лисовский, В.Г., Ю.И. Курбатов, Е.Р. Возняк), градостроительной истории и проблемам градостроительного развития (С.В. Семенцов, Г.Е. Русанов, Е.И. Кириченко, П.Н. Никонов, Л.П. Лавров, Н.А. Акулова). Единичные исследования [1, с. 47] предлагают комплексный анализ территории исторического центра как целостного городского ландшафта и ансамбля в рамках выстроенной теории градостроительного развития Санкт-Петербурга (С.В. Семенцов [2], Г.Е. Русанов [3]).

Композиционная составляющая архитектурно-градостроительного наследия изучается европейскими исследователями. Планированию европейских столиц в XIX веке, градостроительно-композиционным особенностям этого многоаспектного процесса посвящено исследование Томаса Холла (Thomas Hall) [4]. Композиционная составляющая застройки европейского квартала и участка городского центра в их историческом развитии с учетом региональных особенностей подробно рассмотрена в исследовании

В. Зонне (W. Sonne) [5]. Комплексность, системность, стремление изучить многоаспектность генетического кода исторических территорий и поселений демонстрирует исследование под руководством Анжелы де Меер Леча-Марзо (Angela de Meer Lecha-Marzo) [6].

Опираясь на результаты релевантных исследований, рассматривающих иерархичность [7, с. 61], как одну из важнейших составляющих градостроительного генетического кода Санкт-Петербурга, в данном исследовании анализируются и систематизируются в виде иерархии все компоненты композиционной структуры, имеющие признаки ансамблевости (в исследовании такие объекты объединяются понятием композиция) вне зависимости от их масштаба – от композиции в границах участка до композиции всего исторического центра.

Методология. В основе исследования лежит системное изучение огромного накопленного теоретического материала, посвященного изучению исторического центра Санкт-Петербурга. На исторических планах с привязкой к данным современных геоинформационных систем проанализирована структура исторического центра Санкт-Петербурга в контексте временной и пространственной эволюции. Графоаналитический метод исследования позволил выявить в составе единой структуры исторического центра границы и территории композиций разного масштаба, указать количественные данные таких объектов (площадь, длина), представить исторический центр в виде упорядоченной иерархии объектов разного масштаба, выявить уровни иерархии в составе иерархической модели.

Основная часть. Иерархичность можно считать одним из врожденных свойств петербургского градостроительства. Наглядно это демонстрирует проектный «Генеральной чертеж Санкт-Петербурху» Ж.-Б.-А. Леблона 1717 года, самого же архитектора можно считать автором принципа иерархичности (1716–1717) [1, с. 50], который впоследствии получил повсеместное воплощение в процессе градостроительного развития Санкт-Петербурга вплоть до 1956 года. На плане (рис. 1) иерархию параметров имеют улицы (главные, средние, местные, малые улицы), каналы (по главным улицам, по средним и местным, в пригородных зонах огородов и кладбищ), площади (крупные и средние квадратные и круглые площади, главная площадь центра города с дворцом Петра I на Васильевском острове), доминанты (обозначены 4 соборные церкви, Троицкая церковь, 18 приходских церк-

вей), жилые кварталы (элитарное жилье, большие и малые рядовые участки) [8, с. 84]. Помимо такой специально выработанной упорядоченности элементов градоструктуры по типам, город целиком представляет собой законченную композицию – лучевую, где город – это центр, а крепостное кольцо и внегородские территории организованы посредством множества расходящихся от центра лучей. Но и это еще не все. Дополнительно между двумя крайними градостроительными масштабами – города и малой площади – можно выявить ряд промежуточных: например, регулярные планировочные сетки Васильевского (рис. 1, а) и Петербургского островов (рис. 1, б), крупную центрально-лучевую композицию на Васильевском острове (рис. 1, в), группы жилых кварталов (рис. 1, г), линейные композиции пространств рек в границах города (рис. 1, д). Согласование множества композиций разного масштаба придает структуре города композиционную гармонию на плане, известную за его красоту и выразительность [2, с. 4].

Определяющим для понятия композиции является представление о ней как о целостности разнообразных элементов в ее составе. Подобную характеристику дает Альберти, описывая «красоту» как «строгую соразмерную гармонию всех частей, объединяемых тем, чему они принадлежат, – такая, что ни прибавить, ни убавить, ни изменить ничего нельзя, не сделав хуже» [9, 178]. Философское понятие целостности [11] применительно к градостроительной композиции можно определить, как ее свойство как совокупности составляющих ее элементов (зданий, площадей, улиц, доминант и др.), организованных в соответствии с определенными принципами. В рамках исследования такие принципы или характеристика внутренних взаимосвязей композиций становятся обоснованием для дифференциации и объединения схожих по масштабу композиций по группам.

Задачей исследования стало выявление структуры вертикальных и горизонтальных взаимосвязей целостных композиций: от самого большого объекта – ансамбля всего исторического центра до малого петербургского ансамбля. Результатом исследования является аналитическая модель среды исторического центра Санкт-Петербурга в виде иерархии градостроительных композиций. В качестве выводов выявлены особенности такой иерархии. В статье иерархические взаимосвязи прослежены на примере одной вертикальной связи, представленной графически на рисунке 2. Целиком иерархия представлена в таблице 1.

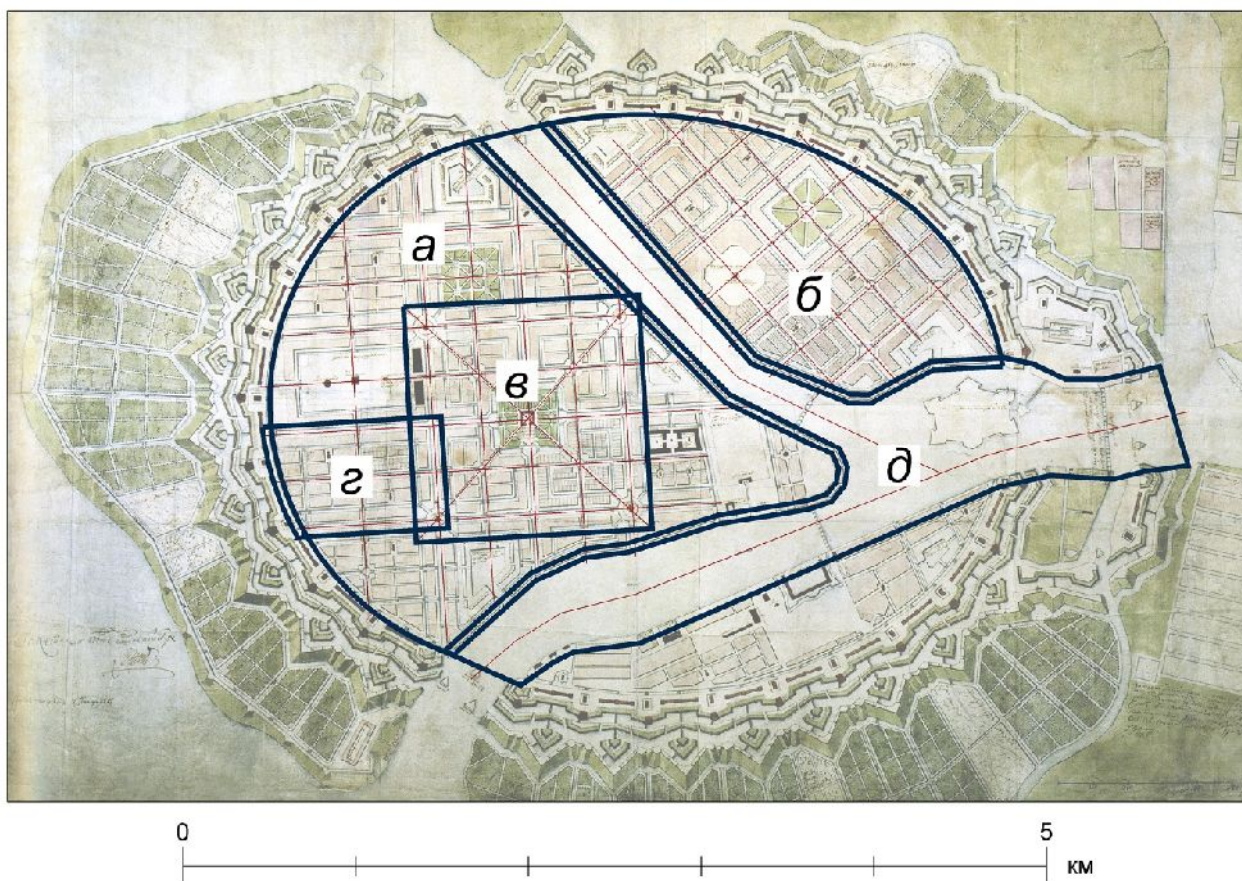


Рис. 1. Генеральный плана Санкт-Петербурга Ж.-Б.-А. Леблона 1717 года

От композиции исторического центра к композиции Казанского собора (рис. 2).

Взгляд на центр города (8000 га) как на объект композиционного единства закрепил план Леблона 1717 года. Несмотря на то, что планировка была принята к реализации лишь частично, в основном в форме принципов и идей [8, с. 95], Леблон заложил важное видение города как ансамблевого, цельного объекта. Центральное пространство реки Невы служит связующим звеном, реально объединяющим главные ансамбли сторон города (Петропавловская крепость и Троицкая площадь, Биржа, Адмиралтейство, Зимний дворец, Дворцовая набережная, Летний сад) и формирует ядро всего исторического центра города [11, с. 26].

В основе композиции Адмиралтейско-Московской стороны (2600 га) лежит планировочная концепция системы пересечения лучей Адмиралтейства с улицами (Морские улицы, Казанская улица, Садовая улица, Литейный-Владимирский-Загородный проспекты) и реками (река Мойка, канал Грибоедова, река Фонтанка). Градостроительно-композиционное решение и столичная роль была закреплена за Адмиралтейской частью

после пожаров 1736 и 1737 гг., когда усилиями «Комиссии о Санкт-Петербургском строении» был разработан новый генеральный план части [11, с. 35]. Комиссия наметила Большую Садовую улицу (реализация 1740–1750 гг.), Загородный проспект. Под руководством Б.-Х. Миниха (глава Комиссии) и П.М. Еропкина (главный архитектор), была запланирована развитая система каналов, в которую входили позднее осуществленные Екатерининский (реализация 1760–1770 гг.), Лиговский и Обводные каналы [12, 418].

Композиция Пятилучия Адмиралтейства (590 га) – Миллионная, Невский, Гороховая, Вознесенский, Галерная – является основным компонентом в составе композиции Адмиралтейской части. Впервые наиболее известная лучевая композиция исторического центра Санкт-Петербурга представлена в проекте Николая Гербея 1719 года [С.В. Семенцов]. После пожара 1737 года Минихом окончательно закреплена лучевая система [11, с. 35], от Адмиралтейства до Фонтанки прокладывается Гороховая улица, задуманная при Петре I [12, с. 418]. В 1730-е гг. начал обстраиваться заложенный при Петре Вознесенский проспект [12, с. 412].

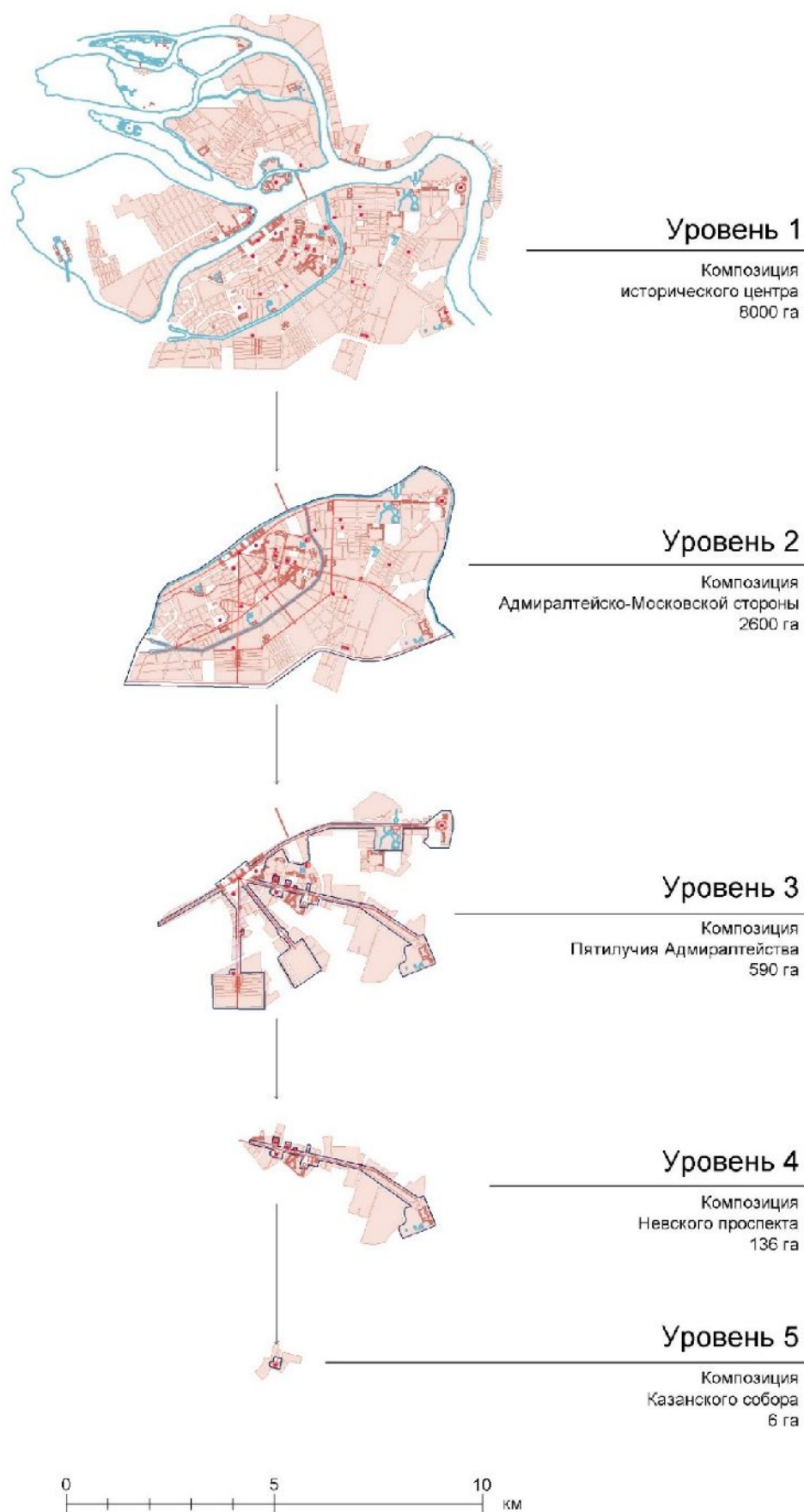


Рис. 2. Иерархия исторического центра на примере вертикальной связи ансамбля исторического центра Санкт-Петербурга и композиции Казанского собора

Таблица 1

Пять уровней градостроительных композиций Санкт-Петербурга

№ ур-вня	Масштаб композиций, га	Кол-во композиций	Классификация градостроительных композиций и признаки их целостности
1	8000	1	Исторический центр Санкт-Петербурга: - центр всей петербургской агломерации относительно масштаба всей агломерации; - проектный генеральный план Леблona 1717 года объединил городские территории в единую композицию; - центральное пространство реки Невы и прилегающих ансамблей является ядром единого объекта исторического центра.
2	2600–1300	4	Стороны исторического центра Санкт-Петербурга – Петербургская (1800 га), Василеостровская (1300 га), Адмиралтейско-Московская (2600 га), Выборгская: - на Петербургской, Василеостровской, Адмиралтейской сторонах попеременно закладывались городские центры; - каждая из сторон имеет особый характер градостроительной морфологии в соответствии с особым доминирующим принципом организации планировки территории: Примеры композиций уровня: - Петербургская сторона. Для Петербургского и Аптекарского островов характерно сочетание регулярных и иррегулярных «слободских» композиций. Каменный, Елагин, Крестовский, Петровский – группа «пригородов-садов» в центре города [15, с. 43]; - Василеостровскую сторону характеризует ортогонально-сетчатая композиция планировки Трезини 1715 года; - Адмиралтейско-Московскую сторону характеризует система пересечения Пятилучия Адмиралтейства и дуговых улиц, каналов и рек.
3	1400–250	15	Крупные градостроительные композиции, в основе целостности которых лежит единое градостроительно-планировочное решение. Примеры композиций уровня: - река Нева (1400 га), река Фонтанка (421 га), река Мойка (264 га) – линейно-пространственные композиции с главной осью вдоль русла водных объектов; - Пятилучие Адмиралтейства (590 га), Крестовский остров (370 га) – лучевые композиции; - Васильевский остров (395 га) – ортогонально-сетчатая композиция; - и другие [16].
4	150–20	40	Крупные градостроительно-архитектурные композиции Петербурга, целостность которых обосновывают не только градостроительные решения планировки, но и объемные решения застройки. В составе таких ансамблей можно выделить подуровни (например, в составе композиции зоны Петропавловской крепости можно выделить композиции самой крепости, ее Кронверка, а также Александровского парка, построенного на месте гласиса крепости). Примеры композиций уровня: Невский проспект (136 га); оборонительная система Петропавловской крепости (120 га); Каменный остров (105 га); Смольный монастырь (86 га); группа Дворцовой, Адмиралтейской, Сенатской, Исаакиевской, Мариинская площадей (62 га); Александро-Невская лавра (58 га); группа Летнего сада, Марсового поля, Михайловского сада, Инженерного замка (42 га); Коллежская площадь и Биржа (32 га) и другие.
5	20–0,5	150	Малые градостроительно-архитектурные композиции Петербурга, целостность которых обосновывают не только градостроительные решения планировки, объемные решения застройки, но архитектурные решения, формы и детали фасадов. Композиции визуально воспринимаются целиком с одной точки обзора. В составе таких ансамблей можно выделить подуровни (отдельные площади, улицы). Примеры композиций уровня: Новая Голландия (7,5 га), дворец Воронцова (6,6 га), Сенная площадь (6,1 га), Казанский собор и площади (6,0 га), Александринская площадь (5,8 га), Ассигнационный банк (4,7 га), Конюшенное ведомство и площадь (2,9 га), храм Апостола Петра (2,7 га), Армянская церковь (0,8 га) и другие.

Линейная композиция Невского проспекта (136 га), главного из лучей Пятилучия Адмиралтейства, связывает ансамбли Адмиралтейства и Александро-Невской лавры и Лиговский проспект (древнюю новгородскую дорогу). Направление проспекта было установлено в 1712 году, в 1713 году начались работы по его прокладке, к 1718 году проспект был осуществлен [12, с. 412]. Как единый объемно-планировочный ансамбль Невский проспект рассматривала Комиссия строений, проектируя его силуэт ступенчатой линией карниза застройки, которая повышалась от Караванной улицы к центру – доминанте башни Адмиралтейства [12, с. 418]. Архитектурно-стилистический целостный ансамбль классицизма представляет собой Невский проспект на развертке В.С. Садовникова 1830 года [13, с. 70]. Часть проспекта от Адмиралтейства до Фонтанки каждые 100 метров раскрывается прилегающими ансамблями площадей, каналов и улиц, и формирует самостоятельную композицию в составе проспекта.

Одним из ансамблей, ориентированных на Невский проспект является композиция Казанского собора (6 га). 27 августа 1801 года состоялась официальная закладка собора, 15 сентября 1811 года собор был торжественно освящен [14, с. 5]. Проектом А.Н. Воронихина была предусмотрена реконструкция существующей на тот момент композиции с доминантой Рождество-Богородицкой церкви (построена М.Г. Земцовым в 1737 году). Развитие получили существующие крупные прилегающие пространства за счет создания во взаимосвязи с ними четырех новых композиций меньшего масштаба: оформленной колоннадой площади со стороны Невского проспекта, аналогичной площади с противоположной стороны (нереализована), полукруглой площади со стороны главного входа с Казанской улицы, площади у апсиды храма со стороны Екатерининского канала [14, лист 5 в разделе иллюстраций].

Выводы. Особенности иерархии градостроительных композиций исторического центра Санкт-Петербурга:

1. Многоуровневость – градокомпозиционная структура состоит из 5 основных уровней. Каждый уровень представлен композициями, сгруппированными на основании параметра масштаба и характеристики их целостности. Важной характеристикой является общее количество композиций уровня – чем выше уровень, тем меньше композиций на нем. Дополнительно к основным уровням зачастую можно выделить подуровни, что отражает сложность устройства ансамблей центра Петербурга.

2. Вертикальная взаимосвязность – композиции имеют вертикальную связь с композициями уровней выше и уровней ниже. Например, Садовая улица (ур. 3) входит в состав композиции Московской стороны (ур. 2) и имеет в своем составе композицию Никольского морского собора (ур. 4).

3. Диапазон масштаба – на каждом уровне, с учетом проблематики реального проектирования и реальной среды, формируются крупные масштабные рамки, где-то «пересекающиеся» с масштабными границами соседних уровней. Иерархия реальной градокомпозиционной структуры города не является «чистой» и «строгой», а отражает особенности устройства и процессов исторического развития градостроительной структуры Санкт-Петербурга.

4. Тотальность распространения – иерархичность свойственна всей территории исторического центра Санкт-Петербурга.

5. Неравномерность распространения – в разных зонах и в разных точках города иерархия может иметь разное количество уровней и подуровней, и формировать среды разного градостроительного качества (от наиболее многоуровневой в центре, к более простой на периферии центра).

Планомерность исторического развития – от периода к периоду иерархия «прорастала» от первых более крупных композиций, и далее к композициям меньшего масштаба в соответствии с уровнями иерархии. Однако, есть исключения – например, Пятилучие Адмиралтейства, возникшее с учетом уже существовавшего на тот момент направления Невского проспекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенцов С.В. Начало создания регулярной Санкт-Петербургской агломерации при Петре Первом // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3. С. 46–55.
2. Семенцов С.В. Санкт-петербургская историческая агломерация – уникальный градостроительный объект мирового масштаба // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012. № 1. С. 1–14.
3. Русанов Г.Е. Динамика структуры территориальных ансамблей на примере Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3. С. 57–60.
4. Thomas H. Planning Europe's Capital Cities: Aspects of Nineteenth-Century Urban Development. L.: Routledge, 1997. 408 p.
5. Meer Lecha-Marzo A. de. Evaluation of Regional and Landscape Heritage. The Nansa valley and Penarrubia (Cantabria). Santander: Fundacion Botin, 2012. 370 p.

6. Sonne W. Dwelling in the metropolis: Reformed urban blocks 1890–1940 as a model for the sustainable compact city // *Progress in Planning*. 2009. No. 72. Pp. 53–149.
7. Семенцов С.В., Мангушев Р.А. Архитектура и инженерия ансамблей Санкт-Петербурга // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. №3. С. 61–67.
8. Семенцов С.В. Санкт-Петербург на планах и картах первой половины XVIII века. СПб.: Туристический и культурный центр Эклектика, 2004. 436 с.
9. Овсянников М.Ф. История эстетики. Памятники мировой эстетической мысли в пяти томах. Т. I. Античность, Средние века, Возрождение. М.: Изд-во. Академии художеств СССР, 1962. 682 с.
10. Степин В.С. Новая философская энциклопедия: в 4 т. М.: Мысль, 2010. 744 с.
11. Горбатенко С. Всемирное наследие – исторический ландшафт Санкт-Петербургской агломерации. СПб.: Зодчий, 2011. 116 с.
12. Бунин А.В. История градостроительного искусства. Т. I. Градостроительство рабовладельческого строя и феодализма. М.: Стройиздат, 1979. 495 с.
13. Лавров Л.П. Родословная петербургского дома на его штукатурном фасаде // *Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук*. 2016. С. 68–72.
14. Аплаксин А. Казанский собор 1811–1911 в Санкт-Петербурге. СПб.: Т-во Р. Голике и А. Вильборг, 1911. 90 с.
15. Семенцов С.В. Идеи «городов-садов» и традиции Санкт-Петербургского и Петроградского градостроительства // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. No 5. С. 26–49.
16. Маркушев С.О. Типология градостроительных композиций исторического центра Санкт-Петербурга // *Архитектон: известия вузов*. 2019. № 4. С. 1–9.

Информация об авторах

Маркушев Сергей Олегович, аспирант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: s.markushev@inbox.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила в январе 2020 г.

© Маркушев С.О., 2020

Markushev S.O.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: s.markushev@inbox.ru*

HIERARCHY OF URBAN PLANNING COMPOSITIONS OF DIFFERENT SCALES IN THE STRUCTURE OF THE HISTORICAL CENTER OF ST. PETERSBURG

Abstract. *The article considers the urban planning structure of the historical center of St. Petersburg as a hierarchy of ensembles. Urban ensemble compositions in the study are systematized regardless of their scale. The introduction presents the main problems of perceiving the city center as a system of interconnected ensembles. A brief review of relevant studies, domestic and foreign, is offered addressing the problems of the compositional and spatial structure organization of the city. The plan of J.-B.-A. Leblon 1717 as an example of a holistic urban ensemble is analyzed. The features of the existing hierarchical relationships are traced through the example of one vertical connection: the composition of the historical center, the composition of the Admiralty-Moscow side, the composition of the Five Axes of the Admiralty, the composition of Nevsky Prospect, the composition of Kazan Cathedral. For visualization purposes, the text description is supplemented by a figure illustrating the nature of the hierarchical relationships of the compositions. A 5-level hierarchical model of the environment of the historical center of St. Petersburg is developed and presented in the form of a table with the scale frames of each of the levels. The characteristic of integrity is proposed as a justification for the grouping of ensembles by levels. The conclusions suggest the features of the hierarchy of urban planning composition of the historical center of St. Petersburg: multi-levelness, vertical interconnectedness, large ranges of scale, totality of distribution, uneven distribution, gradual historical development.*

Keywords: *urban planning structure, historical center of St. Petersburg, ensemble, urban planning composition, scale, integrity*

REFERENCES

1. Sementsov S.V. Beginning of the creation of a regular St. Petersburg agglomeration under Peter the Great [Nachalo sozdaniya reguljarnoj Sankt-Peterburgskoj aglomeracii pri Petre Pervom]. Bulletin of Civil Engineers. 2014. No. 3. Pp. 46–55. (rus)
2. Sementsov S.V. St. Petersburg historical agglomeration - a unique urban development site on a global scale [Sankt-peterburgskaya istoricheskaya aglomeraciya – unikalnij gradostroitelnyj obyekt mirovogo masshtaba]. Internet bulletin of VolgGASU. 2012. No. 1. Pp. 1–14. (rus)
3. Rusanov G.E. The dynamics of the structure of territorial ensembles on the example of St. Petersburg [Dinamika struktury territorialnyh ansamblej na primere Sankt-Peterburga]. Bulletin of civil engineers. 2012. No. 3. Pp. 57–60. (rus)
4. Thomas H. Planning Europe's Capital Cities: Aspects of Nineteenth-Century Urban Development. L.: Routledge, 1997. 408 p.
6. Meer Lecha-Marzo A.de. Evaluation of Regional and Landscape Heritage. The Nansa valley and Penarrubia (Cantabria). Santander: Fundacion Botin, 2012. 370 p.
7. Sonne W. Dwelling in the metropolis: Reformed urban blocks 1890–1940 as a model for the sustainable compact city. Progress in Planning. 2009. Vol. 72. Pp. 53–149
8. Sementsov S.V., Mangushev R.A. Architecture and engineering of ensembles of St. Petersburg [Arhitektura i inzheneriya ansamblej Sankt-Peterburga]. Bulletin of Civil Engineers. 2012. No. 3. Pp. 61–67. (rus)
9. Sementov S.V. St. Petersburg on the plans and maps of the first half of the XVIII century [Sankt-Peterburg na planah i kartah pervoj poloviny XVIII veka]. SPb.: Tourist and cultural center Eklektika, 2004. 436 p. (rus)
10. Ovsyannikov M.F. History of aesthetics. Monuments of world aesthetic thought in five volumes. T. I. Antiquity, Middle Ages, Renaissance [Pamyatniki mirovoj esteticheskoy mysli v pyati tomah. T. I. Antichnost, Srednie veka, Vozrozhdenie]. M.: Publishing house of Academy of Arts of the USSR, 1962. 682 p. (rus)
11. Stepin V.S. New philosophical encyclopedia: in 4 volumes [Novaya filosofskaya enciklopediya: v 4 t.]. M.: Mysl, 2010. 744 p. (rus)
12. Gorbatenko S. World Heritage - the historical landscape of the St. Petersburg agglomeration [Vsemirnoe nasledie – istoricheskij landschaft Sankt-Peterburgskoj aglomeracii]. SPb.: Zodchiy, 2011. 116 p. (rus)
13. Bunin A.V. History of urban art. Vol. I. Urban planning of the slave system and feudalism [Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. T. I. Gradostroitel'stvo rabovladelcheskogo stroya i feodalizma]. M.: Stroyizdat, 1979. 495 p. (rus)
14. Lavrov L.P. Pedigree of the St. Petersburg house on its plaster facade [Rodoslovnaya peterburgskogo doma na ego shtukaturnom fasade]. Sbornik nauchnyh trudov RAASN. Rossijskaya akademiya arhitektury i stroitel'nyh nauk. 2016. Pp. 68–72. (rus)
15. Aplaksin A. Kazan Cathedral 1811–1911 in St. Petersburg [Kazanskij sobor 1811–1911 v Sankt-Peterburge]. SPb.: Publishing house of R. Golike and A. Vilborg, 1911. 90 p. (rus)
16. Sementsov S.V. Ideas of “garden cities” and traditions of St. Petersburg and Petrograd urban planning [Idei «gorodov-sadov» i tradicii sankt-peterburgskogo i petrogradskogo gradostroitel'stva]. Bulletin of Civil Engineers. 2018. No. 5. Pp. 26–49. (rus)
17. Markushev S.O. Typology of urban planning compositions of the historical center of St. Petersburg [Tipologiya gradostroitel'nyh kompozicij istoricheskogo centra Sankt-Peterburga]. Architecton: University News. 2019. No. 4. Pp. 1–9. (rus)

Information about the authors

Markushev, Sergei O. Postgraduate student. E-mail: s.markushev@inbox.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received in January 2020

Для цитирования:

Маркушев С.О. Иерархия градостроительных композиций разного масштаба в структуре исторического центра Санкт-Петербурга // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 68–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-68-75

For citation:

Markushev S.O. Hierarchy of urban planning compositions of different scales in the structure of the historical center of St. Petersburg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 68–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-68-75

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-76-81

Дубровина Н.П.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: Natalizar@list.ru

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ РОЛЬ ДВОРЦОВ КУЛЬТУРЫ ЛЕНИНГРАДА ПЕРВОЙ ТРЕТИ XX ВЕКА НА ПРИМЕРЕ ПЕТРОГРАДСКОГО И ВАСИЛЕОСТРОВСКОГО РАЙОНОВ

Аннотация. В России опыт реставрации памятников архитектуры XX века насчитывает всего несколько десятилетий, и процесс этот оказался сложным и противоречивым. Становится очевидным, что по сравнению с историей классической реставрации, «новое наследие» требует формирования собственной методологии реставрации. При реставрации и реконструкции Дворцов культуры первой трети XX века необходимо учитывать не только характеристики самого здания, но и градостроительную ситуацию. Дворец культуры, как особый тип зданий, необходимо изучать в его исторической среде. Все Дворцы культуры Ленинграда запроектированы как важные элементы градостроительных районных центров. Размещение Дворца культуры в структуре района тщательно выбиралось исходя из градостроительной ситуации и с целью создания нового культурного и планировочного центра, а в некоторых случаях – градостроительного ансамбля. В данной работе рассмотрено проектное и современное градостроительное значение Дворцов культуры эпохи авангарда Петроградского и Василеостровского районов Ленинграда (современного Санкт-Петербурга), а именно Дворца культуры им. Ленсовета и Дворца культуры им. С. М. Кирова. Установлено, что рассматриваемые Дворцы культуры являлись важными элементами градостроительного ансамбля в системе композиционно-пространственного каркаса города и/или частью архитектурно-градостроительного комплекса зданий районного значения.

Ключевые слова: конструктивизм, Дворец культуры, архитектура авангарда, градостроительство, объект культурного наследия, градостроительный ансамбль.

Введение. Реставрация архитектурного наследия XX века в России насчитывает не более трёх десятилетий. В Санкт-Петербурге актуален вопрос реставрации и приспособления Дворцов культуры в связи с аварийным состоянием и утратой нескольких особо уникальных объектов. Градостроительному значению Дворцов культуры Ленинграда первой трети XX века, как особого типа зданий, не уделяется должного внимания современных исследователей. В путеводителе Б. М. Кирикова и М. С. Штиглиц [6], посвященному памятникам конструктивизма Санкт-Петербурга, даётся краткое описание в том числе и градостроительной ситуации. Однако данная работа больше направлена на подробное архитектурно-художественное описание памятников. В то время как градостроительному значению Дворцов культуры советского периода других городов, например, Казани [5], Новосибирска [4] посвящен ряд исследовательских работ. Огромный вклад в изучение архитектуры Советского авангарда внёс С.О. Хан-Магомедов [9]. Истории, уточнению авторства и датировок некоторых Дворцов культуры Ленинграда посвящены работы Даянова Р.М. [1], Дубровиной Н.П. [2, 3]

Вопрос градостроительного регулирования территорий, где размещены Дворцы культуры первой трети XX века, в Санкт-Петербурге требует дополнительной проработки. Актуальность работы

связана одновременно с несколькими задачами: определение исторической градостроительной значимости конструктивистских Дворцов культуры Санкт-Петербурга, анализ существующей градостроительной ситуации и обозначение проблем градостроительного регулирования территорий памятников, а также земельных участков, исторически связанных с памятником.

Методология. Методологической основой исследования является комплексный подход к изучению архитектурного наследия 1920-30-х гг., Домов и Дворцов культуры Ленинграда первой трети XX века. В исследовании последовательно применялись следующие методы:

- изучение и обобщение научных и библиографических источников, законодательных, нормативно-правовых документов, иконографических материалов, архивных материалов по теме исследования, изучение интернет-источников;
- натурное обследование Домов и Дворцов культуры Ленинграда с целью изучения современного состояния зданий, их современной функционально-планировочной структуры, сложившейся современной градостроительной ситуации;
- камеральная обработка выполненных исследований.

Основная часть.***Петроградский район. Дворец культуры им. Ленсовета (Е.А. Левинсон, В.О. Мунц, 1930-1938 гг.)***

Дворец культуры им. Ленсовета расположен на пересечении Каменноостровского, Левашовского и Малого проспектов Петроградской стороны (рис. 1). Территория, где ныне расположен Дворец культуры, в начале XX века представляла собой малоблагоустроенный район, в основном, с малоэтажной застройкой, не имеющий единого планировочного и стилистического решения. В 1910 году на участке нынешнего Дворца культуры по проекту С. Г. Гингера строится грандиозное сооружение – «Скэтинг-ринг». Строительству этого здания посвящена статья Р. М. Даянова [1], где дано описание его архитектурно-художественного решения: «центр композиции в плане составлял вытянутый овальный зал для катания. Во внешнем восприятии акцент смещён на главный фасад по Каменноостровскому проспекту. Массивный помпезный портик во всю ширину и высоту фасада оформлен ордерами колоннами: малыми (ионическими) и более крупными (коринфскими) и увенчан квадригой». Здание «Скэйт-ринга» существовало вне градостроительной ситуации, сложившейся к периоду его строительства. В 1920-х гг здание пришло в упадок и подверглось частичному разрушению.

Здание Дворца культуры им. Ленсовета проектировалось и строилось с использованием конструкций «Скэйт-ринга», однако, в формах нового стиля – «конструктивизма». Дворец культуры им. Ленсовета по задумке Е.А. Левинсона и В.О. Мунца должен был стать частью градостроительного ансамбля – треугольный участок между Каменноостровским проспектом, Большим проспектом и рекой Карповкой застраивался по углам зданиями Дворца культуры, первого и второго жилых домов Ленсовета. По проекту здания имели визуальные и планировочные связи. Через реку Карповку планировался пешеходный мост на оси, соединяющей ось грандиозного портала Дворца культуры и композиционный центр первого жилого дома Ленсовета (рис. 2). Дворец культуры Промкооперации (ныне – Дворец культуры им. Ленсовета) должен был стать мощной градостроительной доминантой благодаря динамичной композиции с 46-и метровой башней, запроектированной на углу здания.

Дворец культуры им. Ленсовета не приобрёл запланированной авторами проекта градостроительной роли. Проект застройки этой части района не был полностью осуществлён, а угловая башня осталась недостроенной. Стоит подчеркнуть, что с конца 1950-х годов Е.А. Левинсон добивался до-

стройки башни. В письме Архитектурно-планировочного управления Ленгорисполкома директору Дома культуры говорится: «Учитывая расположение Дома культуры на одной из основных магистралей города, в настоящее время являющейся частью магистрали Москва-Хельсинки, Архитектурно-планировочное управление Ленгорисполкома настоятельно требует, чтобы в 1961 году были завершены все строительные работы по окончательному формированию объёмного решения здания» [11].

В наше время территория объекта культурного наследия – Дворца культуры им. Ленсовета включает пятно застройки с внутренним двором. Для сохранения исторической градостроительной значимости объекта, пусть и не осуществлённой в полном объёме, необходимо расширить территорию объекта культурного значения, включая площадь Шевченко с Ординарным сквером, территорию между Каменноостровским проспектом и рекой Карповкой (для сохранения визуальной связи Дворца культуры и первого жилого дома Ленсовета), а также урегулировать возможную высоту капитального строительства до Ординарной улицы (рис. 3).

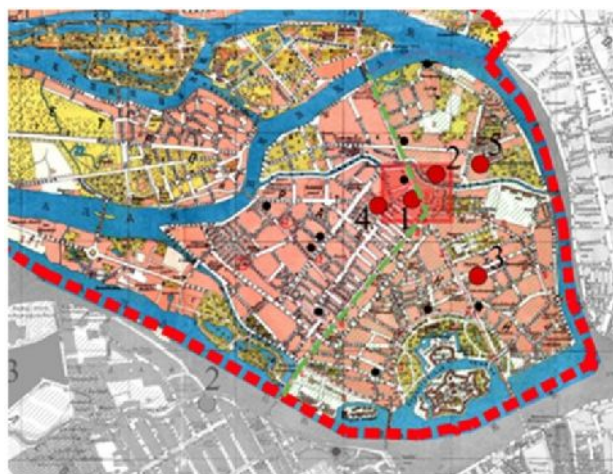


Рис. 1. Схема размещения Дворца культуры им. Ленсовета в структуре Петроградского района:
1 – Дворец культуры им. Ленсовета; 2 – Первый жилой дом Ленсовета; 3 – Петроградский райсовет; 4 – Жилой дом Свирьстроя; 5 – Административное здание завода Полиграфмаш

Василеостровский район. Дворец культуры им. С.М. Кирова (Василеостровский дом культуры, Троцкий Н.А., Козак С.Н., Ильин Е.А., 1931-1937 гг.)

Здание Дворца культуры им. С. М. Кирова расположено на Большом проспекте Васильевского острова между 28-29 и 24-25 линиями (рис. 3). Эта территория не была освоена вплоть до 1930-х годов, здесь простирался пустырь, где «во времена усиления царских репрессий... проводились пуб-

личные казни революционеров» [7]. Дворец культуры Василеостровского района должен был стать крупнейшим в стране, символом советской власти. Обществом архитекторов-художников в 1930 году

был организован всесоюзный конкурс проектов. Первую премию получил проект архитектора Н.А. Троцкого и С.Н. Козака, составленный в институте «Гипрогор».



Рис. 2. Дворец культуры им. Ленсовета. Ситуационный план с показом проектного положения: 1 – Дворец культуры им. Ленсовета (осуществлённые корпуса); 2 – Неосуществлённый корпус Дворца культуры им. Ленсовета; 3 – Первый жилой дом Ленсовета; 4 – Неосуществлённый мост через р. Карповку



Рис. 3. Дворец культуры им. Ленсовета. Предложения по расширению территории объекта культурного наследия

Для строительства Дворца культуры выбрана неосвоенная прежде территория Васильевского острова, где планировалось создавать новый район. Здесь размещаются важные городские объекты. После 1917 года на Большом проспекте Васильевского острова расположился райком партии, затем – райсовет. В 1920-х гг. происходит возрождение «Петроградского радиоаппаратного завода им. Козицкого» (бывш. Здание главных телеграф-

ных мастерских "Сименс и Гальске"). В 1930-х годах планировалась застройка острова Декабристов жилыми массивами для рабочих. Место, выбранное для размещения Дворца культуры, является важным планировочным узлом – между Большим и Средним проспектами, с большой открытой площадью. В непосредственной близости по линии Большого проспекта строится Василеостровская

фабрика-кухня по проекту архитекторов А.К. Барутчева, И.А. Гильтера, И.А. Меерзона, Я.О. Рубанчика (рис. 4).

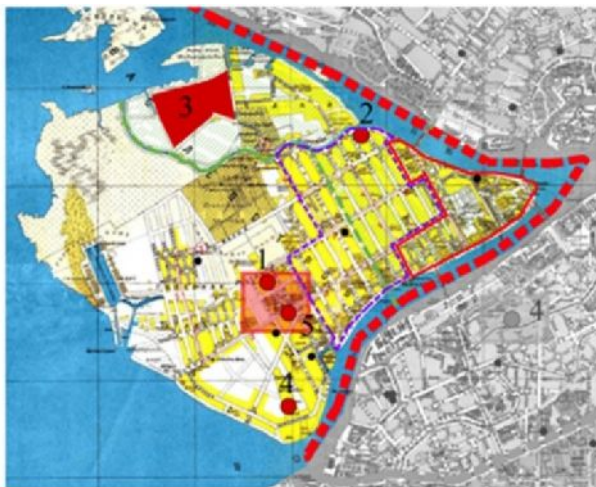


Рис. 4. Схема размещения Дворца культуры им. С. М. Кирова в структуре Василеостровского района: 1 – Дворец культуры им. С. М. Кирова; 2 – Ленинградский радиоаппаратный завод им. Козицкого; 3 – «Новый Петербург»; 4 – Балтийский завод (реконструирован)



Рис. 5. Дворец культуры им. С. М. Кирова. Ситуационный план. Проектное положение: 1 – Дворец культуры им. С. М. Кирова. Осуществлённая клубная часть; 2 – Большой театральный корпус (не осуществлён); 3 – Фабрика-кухня Василеостровского района; 4 – Заводоуправление Сталепрокатного завода (кон. 1930-х – нач. 1950-х, арх. А. П. Бурышкин); 5 – Жилой дом при понижающей электроподстанции, (1933 г., арх. А. К. Барутчев)

На сегодняшний день градостроительное значение Дворца культуры утрачено. Площадь, на которой располагался Дворец культуры, застроена многоэтажными жилыми и общественными зданиями. Таким образом, Дворец культуры располагается внутри квартала, и не обозревается с Большого и Среднего проспектов Васильевского острова. Территория объекта культурного наследия феде-

рального значения включает непосредственно территорию, занимавшую зданием, и часть бывшей площади Дворца культуры. Для сохранения градостроительной значимости объекта необходимо расширить территорию объекта культурного наследия до исторических габаритов площади, а также восстановить культурно-просветительское значение Дворца культуры.



- объект культурного наследия федерального значения - "Дворец культуры им. С. М. Кирова"
- современная 18-этажная застройка
- многоэтажная застройка советского периода
- территория объекта культурного наследия (существующее положение)
- территория объекта культурного наследия (предложения по расширению)

Рис. 6. Дворец культуры им. С. М. Кирова.

Предложения по расширению территории объекта культурного наследия.

Выводы. Исследуемые Дворцы культуры Ленинграда (современного Санкт-Петербурга) проектировались как часть градостроительного, культурно-просветительского центра городского и/или районного значения. Дом культуры организовывал важный градостроительный и планировочный узел или являлся культурным центром нового района Ленинграда. Градостроительное значение Дома культуры в составе города, района – одна из важнейших характеристик этого особого типа зданий. На примере Дворцов культуры Петроградского и Василеостровского районов Ленинграда можно сделать вывод о частичной или полной утрате их градостроительной роли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даянов Р.М. Спортинг-палас и Дом культуры ЛОСПК: авторство, датировка, преемственность // Вестник гражданских инженеров. 2018. №1. С. 10–16.
2. Дубровина Н.П. Дворец культуры им. С.М. Кирова в Санкт-Петербурге: история развития территории, строительная история здания // Инновационный потенциал науки в современном мире: достижения и инновации. Сборник

статей по материалам I международной научно-практической конференции. Уфа, 2019. С. 162–168.

3. Дубровина Н.П. Дома культуры Ленинграда. Проблемы использования и сохранения // Урбанистика. 2019. № 3. С. 7–17. DOI: 10.7256/2310-8673.2019.3.30075 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30075

4. Духанов С.С. Архитектура рабочих клубов и Дворцов культуры города Новосибирск 1920 – первой половины 1950-х гг.: дисс. ... канд. архитектурн. наук. Новосибирск, 2006. 280 с.

5. Искандаров М.М., Михайлов А.Ю. Дворцы культуры – главный нереализованный проект генерального плана «Новой Казани» // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2012. № 2-2(16). С. 72–77

6. Кириков Б.М., Штиглиц М.С. Архитектура ленинградского авангарда. Путеводитель. С-Пб.: Коло, 2008. 384 с.

7. Ленинград. Путеводитель. Составители: Витязева В. А., Кириков Б. М. Л.: Лениздат. Изд. 2-е, 1986. 286 с.

8. Семенцов С.В. Градостроительство Петрограда-Ленинграда: от революционного разгрома 1917-1918 годов к возрождению 1935 г. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 15. 2012. Вып. 1. С. 130–143.

9. Хан-Магомедов С. О. Социальные и архитектурно-планировочные поиски типа рабочего клуба в 20-30-х гг. и их значение для современной практики // Клуб и художественная самодеятельность. 1974. № 5. С. 27–39.

10. Федеральный закон от 25.06.2002 N 73-ФЗ (ред. от 21.02.2019) "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации"

11. ЦГАЛИ СПб. Ф. 345. Оп.3. Д.19. Л.2. Письмо от 19 января 1961 г. №5/438.

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

13. Metspalu P. Revisiting the role of architects in planning large-scale housing in the USSR: the birth of socialist residential districts in Tallinn, Estonia, 1957–1979 // Planning Perspectives. 2018. Vol. 3. Pp. 335–361.

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

Информация об авторах

Дубровина Наталья Павловна, ассистент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: natalizar@list.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Поступила в январе 2020 г.

© Дубровина Н.П., 2020

Dubrovina N.P.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: Natalizar@list.ru

URBAN ROLE OF THE LENINGRAD PALACES OF CULTURE OF THE FIRST THIRD OF THE XX CENTURY ON THE EXAMPLE OF PETROGRADSKY AND VASILEOROVSKY DISTRICTS

Abstract. In Russia, the experience of restoration of architectural monuments of the twentieth century totals only a few decades, and this process turned out to be complex and contradictory. It becomes obvious that, in comparison with the history of classical restoration, the “new heritage” requires the formation of its own restoration methodology. During the restoration and reconstruction of the Palaces of Culture of the first third of the twentieth century, it is necessary to take into account the characteristics of the building itself and the urban planning situation. The Palace of Culture, as a special type of building, must be studied in its historical environment. All Leningrad Culture Palaces are designed as important elements of urban planning regional centers. The placement of the Palace of Culture in the district structure was carefully selected based on the urban planning situation and with the aim of creating a new cultural and planning center, and in some cases, an urban ensemble. This paper discusses the design and contemporary urban importance of the Palaces of Culture of the era of the avant-garde of the Petrogradsky and Vasileostrovsky districts of Leningrad (modern St. Petersburg), namely the Lensoviet Palace of Culture and the Palace of Culture named after S. M. Kirov. It is established that the Palaces of Culture in question are important elements of the urban planning ensemble

in the compositional and spatial framework of the city and / or part of the architectural and urban planning complex of buildings of regional significance.

Keywords: *constructivism, the Palace of Culture, avant-garde architecture, urban planning, a cultural heritage site, urban planning ensemble.*

REFERENCES

1. Dayanov R.M. Sporting Palace and the House of Culture LOSPK: authorship, dating, continuity [Sporting-palas i Dom kul'tury LOSPK: avtorstvo, datirovka, preemstvennost']. Bulletin of civil engineers. 2018. No. 1. Pp. 10–16. (rus)
2. Dubrovina N.P. Palace of Culture. S. M. Kirov in St. Petersburg: the history of the development of the territory, the construction history of the building [Dvorec kul'tury im. S. M. Kirova v Sankt-Peterburge: istoriya razvitiya territorii, stroitel'naya istoriya zdaniya]. Innovacionnyj potencial nauki v sovremennom mire: dostizheniya i innovacii. Sbornik statej po materialam I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Ufa, 2019). 2019. Pp. 162–168. (rus)
3. Dubrovina N.P. The houses of culture of Leningrad. Problems of use and conservation [Doma kul'tury Leningrada. Problemy ispol'zovaniya i sohraneniya]. Urban Studies. 2019. No. 3. Pp. 7–17. DOI: 10.7256 / 2310-8673.2019.3.30075 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30075. (rus)
4. Dukhanov S.S. Architecture of workers' clubs and the Palaces of Culture of the city of Novosibirsk 1920 - the first half of the 1950s [Arhitektura rabochih klubov i Dvorcov kul'tury goroda Novosibirsk 1920 – pervoj poloviny 1950-h gg]: diss. ... cand. architectural sciences. Novosibirsk, 2006. 280 p.
5. Iskandarov M.M., Mikhailov A.Yu. Palaces of culture – the main unrealized draft master plan for the New Kazan [Dvorcy kul'tury – glavnyj nerealizovannyj proekt general'nogo plana «Novoj Kazani»]. Historical, philosophical, political and legal sciences, cultural studies and art history. Questions of theory and practice. 2012. No. 2-2 (16). Pp. 72–77. (rus)
6. Kirikov B.M., Stiglitz M.S. Architecture of the Leningrad avant-garde. Guide [Arhitektura leningradskogo avangarda. Putevoditel']. St. Petersburg: Kolo, 2008. 384 p. (rus)
7. Leningrad. Guide. Compiled by: Vityazeva V.A., Kirikov B.M.L.: Lenizdat. Vol.2. 1986. 286 p. (rus)
8. Sementsov S.V. Urban planning of Petrograd-Leningrad: from the revolutionary defeat of 1917-1918 to the revival of 1935 [Gradostroitel'stvo Petrograda-Leningrada: ot revolyucionnogo razgroma 1917-1918 godov k vozrozhdeniyu 1935 g.]. Bulletin of the St. Petersburg University. Series 15. 2012. Iss. 1. Pp. 130–143. (rus)
9. Khan-Magomedov S.O. Social and architectural-planning searches such as a working club in the 20-30s. and their importance for modern practice [Social'nye i arhitekturno-planirovochnye poiski tipa rabocheho kluba v 20-30-h gg. i ih znachenie dlya sovremennoj praktiki]. Club and amateur art. 1974. No. 5. Pp. 27–39. (rus)
10. Federal law of 06.25.2002 N 73-FZ (as amended on 02.21.2019) “On objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation”
11. TSGALI St. Petersburg. F. 345. Op. 3. D.19. L.2. Letter of January 19, 1961 No. 5/438.
12. Allan, J. Points of Balance: Patterns of Practice in the Conservation of Modern Architecture. Journal of Architectural Conservation. 2007. Vol. 13(2). Pp. 13–46
13. Metspalu P. Revisiting the role of architects in planning large-scale housing in the USSR: the birth of socialist residential districts in Tallinn, Estonia, 1957–1979. Planning Perspectives. 2018. Vol. 3. Pp. 335–361.
14. Hatherley O., Communist Landscapes: A History Through Buildings. The New Press, 2016. 626 p.

Information about the authors

Dubrovina, Natalya P. Assistant. E-mail: natalizar@list.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st.,4

Received in January 2020

Для цитирования:

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

For citation:

Dubrovina N.P. Urban role of the Leningrad palaces of culture of the first third of the XX century on the example of petrogradsky and vasileorovsky districts. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 76–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-76-81

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-82-88

Аль-Шайбани А.А., Шило А.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: al81aa4250@gmail.com*

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЖИЛОЙ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ В ИРАКЕ: ИССЛЕДОВАНИЯ И ЛИТЕРАТУРА

Аннотация. Представлен обзор ряда международных, региональных и местных исследований, связанных с жилой архитектурной средой Ирака, за период 1993–2019 гг. Он имеет целью дать описание существующих концепций жилой архитектурной среды в Ираке и представлений о ее качестве. Всего проанализировано 27 исследований, в которых рассматриваются формирование жилой среды в Ираке, существующие проблемы жилищной политики и перспективы их решения.

В настоящее время в Ираке возник большой массив неформального жилья. Жизнь в нем находится ниже уровня каких-либо притязаний как из-за плохих экономических условий, так и из-за нехватки городских земель, типов жилых единиц, строительных материалов и т.п. Выделена совокупность факторов и понятий, связанных с объективными условиями складывания различных вариантов архитектурной жилой среды в Ираке. Выявлено семь основных факторов формирования жилой архитектурной среды: социальные и культурные, экономические, экологические и климатические, географические, политические и безопасности, субъективные или психологические, планирования.

В исследовании жилой архитектурной среды в Ираке за счет осмысления ежедневного поведения индивидов выработано ее новое понимание как городского контекста. Он зависит от конкретных социокультурных и экономического условий и формируется в соответствии со стандартами и моделями жилищного строительства с учетом требований современной жизни. Для реализации концепции достойного жилья и удовлетворения жилищных потребностей необходимо обеспечить доступ населения к социально приемлемому жилью.

Исследование нацелено на выработку стратегических концепций в области развития жилой архитектурной среды в Ираке путем выработки критериев социально приемлемой жилой среды и выявления, связанных с ними проблем неформального жилья. В исследовании представлены обстоятельства, с которыми сталкивается страна, решая свои проблемы в области обеспечения населения жильем.

Ключевые слова: жилая среда, форма дома, жилищная политика, неформальное жилье, анализ.

Введение. Цель этой статьи – дать описание существующих концепций жилой архитектурной среды в Ираке и представлений о ее качестве.

Объект изучения – существующая литература о жилой архитектурной среде Ирака за период 1993–2019 гг., а также исследования, выполненные за пределами Ирака, но касающиеся аналогичных проблем формирования жилой среды.

Задачи исследования:

1. Выявить научные и культурные контексты, в которых актуализируются современные исследования жилой архитектурной среды.
2. Выявить факторы, влияющие на формирование жилой архитектурной среды в Ираке.
3. Выявить научные направления в исследовании жилой архитектурной среды Ирака.
4. Выявить лакуны в изучении жилой среды в Ираке и определить перспективные направления ее исследования.

Представленный в данной работе анализ концепций жилой среды в Ираке связан с изучением проектных альтернатив, а также шаблонов и методов строительства [1, 2, 3]. Кроме того, в

исследовании предпринимается попытка рассмотреть критерии удовлетворенности жильем и стандарты, отвечающие потребностям семьи в той или иной области страны [2, 5, 6], и принятые на основе того образа жизни, который имеет место в различных социальных средах [4].

Одним из важнейших факторов складывания жилой архитектурной среды в Ираке является семья [7]. Для удовлетворения ее требований государством создаются различные программы, политика и планы жилищного строительства [8, 9].

В настоящее время в Ираке возник большой массив неформального жилья. Жизнь в нем находится ниже уровня каких-либо притязаний из-за плохих экономических условий, нехватки соответствующих типов жилых единиц и их количества, нехватки городских земель, нехватки строительных материалов. Так, количество неформального жилья в столице Ирака Багдаде росло в период с 2004 по 2015 таким образом, что неформально созданных единиц было больше, чем количество официально возведенных строений.

Аналогичная ситуация наблюдается и в других городах, таких, как Басра, Хилла и Наджаф

[10]. Поэтому она требует специального изучения, связанного также с возможностью применения к ее решению жилищных и планировочных стандартов [13, 14].

В имеющейся литературе выделяются три группы исследований, связанных с изучением проблем жилья в Ираке:

1. Классификации жилой архитектурной среды в Ираке;
2. Стандарты удовлетворенности жильем или социально приемлемое жилье;
3. Неформальное жилье.

Они рассматриваются как ядро для решения исследовательской задачи по изучению жилой архитектурной среды в Ираке, уточнению процессов происходящей в ней жизнедеятельности, ее диагностики, принятию планировочных и градостроительных решений.

Обзор литературы.

Доступные исследования базировались на нескольких методах, наиболее важными из которых были методы статистического анализа, а также интервью и полевых наблюдений, опроса, онлайн-анкетирования.

Большинство задач этих исследований было сосредоточено на описании конкретных проблем в конкретной жилой среде, таких, как проблемы нехватки жилья, неформального жилья или образа жизни (стиля проживания) жителей. Большинство исследований касалось архитектурной жилой среды и тех определяющих факторов, которые должны обеспечивать ее приемлемое качество.

В статье рассматриваются исследования, проведенные для разных стран Ближнего Востока, Восточной и Западной Европы, Азии и Америки. Это необходимо для понимания того, как обозначенные проблемы проявлялись в различных социальных и культурных условиях, чтобы извлечь пользу из богатого опыта этих стран. Это также связано с отсутствием специализированных иракских исследований жилой архитектурной среды и определения архитектурных принципов, на которых строится достойная современная жилая среда.

Исследования [1, 2, 3, 13] сосредоточены на климатических и культурных факторах, влияющих на среду обитания и доступность популярных вариантов жилья среди населения. В работах [4, 5, 6, 14, 15] исследуется проблема нехватки места в соответствии с конкретными архитектурными стандартами проектирования. Изменение формы жилища связано как с архитектурными и дизайнерскими решениями, так и с изменениями социальных и экономических условий жизни. Рассматривается необходимость коллективного жилищного строительства.

Другие исследования – [8, 11, 16, 17] – касаются проблем жилищной политики разных стран, создания соответствующих программ и того, как можно собрать необходимые финансовые ресурсы для поддержки жилищного сектора. Отдельно рассматриваются вопросы регулирования спроса и предложения на рынке жилья посредством создания государственно-частных партнерств и поддержки экономического потенциала жителей.

В работах [9, 12, 18, 19], рассматриваются вопросы о конституционности права предоставления жилья и причинах неуспеха в реализации текущей жилищной политики, а также тенденции инвестиционной политики в развитии жилищного сектора и оценки качества жилья.

Исследования [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] сосредоточены на проблеме неформального жилья, его социально-экономической и политической реабилитации как наиболее значимой проблеме в иракском обществе, а также на росте этого явления после 2003 года. Необходимо выяснить, как оно влияет на осмысление современной жилой среды, особенно в Ираке.

Метод анализа литературы.

На основе проведенного обзора литературы ([1–6, 8–13, 15, 16, 18, 22–26]) были выделены наиболее важные направления деятельности и факторы, связанные с формированием жилой архитектурной среды в Ираке. Факторы формирования жилой архитектурной среды, в целом имеющие универсальный характер, но особенно актуальные для Ирака, это: социальные и культурные, экономические, экологические и климатические, географические, политические и безопасности, субъективные или психологические, планирования.

С их учетом связаны соответствующие направления деятельности по формированию жилой среды. Это: архитектурное образование, решение жилищных проблем, разработка жилых стандартов, выявление степени удовлетворенности жильем и определение достойного жилья, разработка жилищных программ и стратегий, выявление самобытности и трансформации жилья. В результате осуществления этих направлений деятельности жилье приобретает определенные качественные характеристики.

Были выделены несколько групп исследований.

Исследования первой группы касались определений различных концепций жилой архитектурной среды и были сосредоточены на смыслах и форме жилой архитектуры [1, 3, 4, 5, 6, 15, 16]. Они представляли комплекс вопросов, касающихся социально-культурных факторов и стандартов удовлетворенности жильем, которые

непосредственно влияют на формирование жилой архитектурной среды.

Исследования второй группы посвящены жилищной политике, программам и стандартам, направленным на решение жилищного кризиса в целом [2, 8, 9, 13, 14, 19, 20]. Они касались жилищных программ, направленных на решение жилищных проблем в разных странах, и утверждения критериев, которые могут быть приняты при решении проблем жилой архитектурной среды Ирака.

Исследования третьей группы сосредоточены на неформальном и случайном жилье [12, 22, 23, 25, 26]. Это наиболее распространенные жилищные проблемы в Ираке. В настоящее время из-за неформального и случайного жилья городская среда не обеспечивает достойной жизни как отдельным лицам, так и семьям, и обществу в целом.

Пути решения выявленных проблем

1. Анализ рассмотренных исследований.

Исследования первой группы показали, что социальные и культурные, а также экологические и климатические факторы оказывают наибольшее влияние на формирование жилых зданий и архитектурных стилей, которые пользуются популярностью среди жителей. Было также показано, что удовлетворенность жильем и жилищные стандарты влияют на образ жизни и социальные отношения, а также на личную неприкосновенность жителей внутри и за пределами их домов.

Психологические факторы и личная заинтересованность в достижении того или иного результата более распространены в социальном или индивидуальном поведении, чем другие факторы.

Вторая группа исследований показывает, что экономические и политические факторы при планировании определяют объективное решение жилищных проблем в рамках используемых жилищных программ. С точки зрения обеспечения жильцов приемлемыми строениями возникает противоречие между предлагаемыми архитектурными решениями и удовлетворенностью жильцов своим жильем и жилищными стандартами в целом. В оценке самобытности и конфиденциальности жилья сильны субъективные и психологические факторы, которые должны соблюдаться.

Третья группа исследований показывает, что неформальное жилье является одной из важнейших проблем, затрудняющих переход к достойной жилой среде. При определении надлежащих решений этой проблемы наибольшее влияние здесь оказывают плановые и экономические факторы. Кроме того, жилищные стандарты должны

быть адаптированы к природным условиям. Разработка соответствующих стратегий строительства является наиболее распространенным направлением решения проблемы неформального жилья. Вышеприведенные исследования также показывают, что такой критерий, как неприкосновенность частной жизни, отсутствует в условиях неформального жилья и не оказывает абсолютно никакого влияния на его формирование. При помощи реализации жилищных программ, реконструкции неформальных районов и переселения из них жильцов возможно также оздоровление ситуации, связанной с преступностью и насилием.

2. Методы достижения удовлетворенности населения жилой архитектурной средой

Исследования показывают, что удовлетворенность жителей жилой средой зависит от качества повседневной жизни и наиболее приемлемых жилищных моделей. Кроме того, модели и стандарты жилья определяются на основе имеющихся экономических возможностей.

3. Переосмысление жилой архитектуры в Ираке.

Архитектурная среда может быть определена как соотношение социальной и культурной деятельности индивидов или общества с элементами, представляющими собой их предметно-пространственное окружение. Это соотношение основано на социальных нормах и культурных традициях и постоянно изменяется в соответствии с современными условиями и требованиями. Кроме того, происходит непрерывное изменение интеллектуальных продуктов, отражающих это соотношение, которые формируются как в профессиональном сознании, так и в сознании потенциальных потребителей результатов профессиональной архитектурной деятельности. Таким образом, в исследовании жилой архитектурной среды в Ираке за счет осмысления ежедневного поведения индивидов может быть выработано ее новое понимание как городского контекста. Он зависит от конкретных социокультурных и экономических условий и формируется в соответствии со стандартами и моделями жилищного строительства на основе устойчивых систем, законов и программ с учетом требований современной жизни. Поэтому для реализации концепции достойного жилья и удовлетворения жилищных потребностей необходимо обеспечить доступ населения к социально приемлемому жилью.

Выводы. С 1993 по 2019 гг. были проведены архитектурные исследования, в которых использовались новейшие методы анализа жилой архитектурной среды и найдено фактическое сопоставление представлений о ней с основными формирующими ее факторами. В результате удалось

выявить основные аспекты создания жилья, жилищных стандартов и условий удовлетворенности жильем. Они включают в себя программы и жилищную политику, а также самобытность, конфиденциальность и преобразование жилой среды.

1. Сформированные концепции привели исследователей к выводу о том, что в современном понимании жилая архитектурная среда должна рассматриваться в городском контексте, зависящем как от конкретных социокультурных условий, так и от стандартов и моделей жилья, основанных на устойчивых системах, законах и программах, учитывающих требования современной жизни.

2. В рассмотренных исследованиях были выявлены факторы, оказавшие влияние на архитектурную среду в общественной сфере, которые были разделены на группы и осмыслены в контексте формирования, проблем и перспектив развития жилой архитектурной среды в Ираке.

3. Предыдущие исследования касались жилой архитектуры во многих аспектах. Некоторые исследования были посвящены социальным факторам, связанным с производством жилых строений, формированием жилой среды или комфортом проживания отдельных лиц и с удовлетворенностью жильем. Другие исследования были сосредоточены на экономических и политических факторах, рынке жилья, жилищных стандартах и программах, используемых для решения жилищной проблемы, а также на нехватке жилья и его строительстве. Ряд исследований был посвящен географическим и экологическим аспектам, методам строительства жилья или проблемам формирования жилой среды, тому, как она может развиваться на протяжении веков, с древности до наших дней, и какой она должна быть сегодня, чтобы соответствовать требованиям современной жизни.

4. Изучение существующей литературы показало, что имеющиеся в Ираке исследования многочисленны и не столь качественны, поскольку в них не использована современная исследовательская методология, которая могла бы охватить жилую среду в различных аспектах и с разных точек зрения. Наиболее важные факторы, которые связаны с проблемами жилой среды, отражены в реалиях страны, а также в неформальном или случайном жилье, которое требует пристального изучения.

5. Очень важно определить критерии, на основе которых формируются решения для конкретных форм жилой среды, которые отражали бы жизнь населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yaqub M. Open Source Architecture : Redefining Residential Architecture in Islamabad. School of Architecture, Art, and Historic Preservation Theses and Projects, 2017. Pp. 28–62.
2. Al-hafith O. et al. Research article. A systematic assessment of architectural approaches for solving the housing problem in Iraq // Front. Archit. Res. 2018. № 24 May. Pp. 3–12.
3. Шахин Ж.Б.-М. Условия формирования малоэтажных жилых домов для высокоплотной городской застройки (на примере Ирака). Автореф. дисс. ... канд. архитектуры. М.: Московский архитектурный институт, 1993. 33 с.
4. Ghaffarianhoseibi A., Berardi U., Dahland N.D. the Essence of Malay Vernacular Houses : Analysis of the Socio-Cultural // Sustain. Cities Soc. 2014. № January. Pp. 156–170.
5. Akalin A. et al. Architecture and engineering students' evaluations of house façades: Preference, complexity and impressiveness // J. Environ. Psychol. Elsevier, 2009. Vol. 29, № 1. Pp. 124–132.
6. Jiboye A.D. Significance of house-type as a determinant of residential quality in Osogbo, Southwest Nigeria // Front. Archit. Res. Elsevier, 2014. Vol. 3, № 1. Pp. 20–27.
7. Kar A.Z., Sarkar A. Exploring the role of Environment-Behavior Studies (EBS) in Residential Architecture-From Literature Review to Field Study // (IRJET). 2017. Vol. 04, № 11. Pp. 409–418.
8. Tiwari P., Rao J. Housing Markets and Housing Policies in India / ed. ADBI Working Paper Series N. 565. <http://hdl.handle.net/10419/161441>, 2016. № April 2016. 1–33 p.
9. A. J.Huda. National Housing Policies in Iraq- A Comparative Study. ,College of Engineering ,University of Baghdad, 2015. Vol. 180.
10. Al-Garaawi H.A.A.N. The Spatial Analysis of Random Residence phenomenon Reality in Al-Kufa City. University of Kufa, Department of Geography, 2014. 170 p.
11. Lien L.L. et al. Assessment and analysis of housing accessibility: adapting the environmental component of the housing enabler to United States applications // J. Hous. Built Environ. 2016. Vol. 31, № 3. Pp. 565–580.
12. Ali K.A., Raswol L.M. Planning for Affordable Housing Units in Duhok City // ZJPAS. 2017. Vol. 28, № 2016. Pp. 342–350.
13. Al-Fadl M. Th. The Social Influence of the Change of the House Form (Baghdad City). the institute of regional & urban planning in Baghdad university, 2005. 183 p.
14. Жданова И.В. Архитектурные методы оценки и совершенствования потребительских свойств жилой среды. Автореф. дисс. ... канд. архитектуры. Казань: ФГБОУ ВПО «Казанский

государственный архитектурно-строительный университет», 2013. 29 с.

15. Irani M., Armstrong P., Rastegar A. Evolution of Residential Building in Iran based on Organization of space // Asian Cult. Hist. 2017. Vol. 9, № 2. P. 46.

16. Onyemaechi P., Samy M. Motives and Motivation for Implementation of Public Private Partnerships (PPPs) in Housing Provision in Nigeria // Mediterr. J. Soc. Sci. 2016. Vol. 7, № 2. Pp. 149–157.

17. Hilber C.A.L., Schöni O. Housing Policies in the United Kingdom, Switzerland, and the United States: Lessons Learned // The Housing Challenge in Emerging Asia: Options and Solutions. Asian Development Bank Institute. Tokyo, Japan: <http://eprints.lse.ac.uk/68085/>, 2016. № October. Pp. 210–254.

18. Xue C.Q.L. Exploring the challenges to housing design quality in China: An empirical study // Habitat Int. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 57, № September. Pp. 242–249.

19. Rahel, Amin M., Salah S. Evaluation of the Sustainable Aspects In Housing Sector To Overcome Housing Stress In Northern Iraq. 2019. Vol. 3, № 1. Pp. 67–81.

20. Meth p. Informal Housing, Gender, Crime And Violence: the Role of Desing in Urban South Africa // Brit. J. Criminol. 2017. Vol. 57, № January

2016. Pp. 402–421.

21. Zhang Y. Land Use Policy The credibility of slums : Informal housing and urban governance in India // Land use policy. Elsevier, 2017. № April. Pp. 1–15.

22. Suhad Kazem Al Moussawi. Urban Housing Planning and Social Consensus: A Field Study of the Neighborhood of the Warriors in Baghdad City. University of Baghdad, Institute of Urban and Regional Planning, 2011. 55 p.

23. Al- juboury H. M. The Phenomenon of Informal Settlements In Some Of Arabic Cities. The Urban and Regional Planning / University of Baghdad, 2008. 175 p.

24. Amado M. et al. Transformation of Informal Settlements: Case of Keywords: Sustainability , Urban Planning , Parametric model , Informal Settlements , GIS // Creat. Commons CC BY. 2018. Vol. 18, № June. Pp. 1–18.

25. Adekoyejo B., Abraham A., Clement O. Emergence of Informal Housing : Implications for Development of Low-Cost Housing Delivery Strategies in Abeokuta , Nigeria. 2017. Vol. 6, № 3. Pp. 191–198.

26. Taha N. The Informal Areas and the ways Treated it with Planning Standard for Residential Areas. Institute of Urban and Regional Planning, University of Baghdad, 2010. 195 p.

Информация об авторах

Аль-Шайбани Алаа Абдали Ханун, аспирант, кафедра архитектуры и градостроительства, E-mail: al81aa4250@gmail.com, архитектурный институт, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Шило Александр Всеволодович, доктор искусствоведения, профессор. E-mail: alexandershilo55@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Поступила в мае 2019 г.

© Аль-Шайбани А.А., Шило А.В., 2020

***Al-Shaibani A.A., Shilo A.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: al81aa4250@gmail.com*

PROBLEMS OF FORMATION RESIDENTIAL ARCHITECTURAL ENVIRONMENT IN IRAQ: RESEARCH AND LITERATURE

Abstract. A review of a number of international, regional and local studies and studies related to the residential architectural environment (1993-2019) aims to describe and define vocabulary and concepts by developing theoretical ideas about the quality of the residential architectural environment in Iraq. In total, 27 studies analyzed the composition of the living environment in Iraq, the current problems of housing policy and the prospects for their resolution. Currently, a large array of informal housing has arisen in Iraq. Life in it is below the level of any claims, both because of poor economic conditions, and because of the lack of urban land, types of housing units, building materials, etc. As a result of this study, a set of factors and concepts relating to objective conditions to lead different options for the architectural living environment in Iraq are highlighted. Seven major factors are identified for the formation of a residential architectural environment:

social and cultural, economic, environmental and climatic, geographical, political and security, subjective or psychological, planning. In a study of the residential architectural environment in Iraq, a new understanding of it as an urban context has been developed by understanding the daily behavior of individuals. It depends on specific sociocultural and economic conditions and is formed in accordance with the standards and models of housing construction, taking into account the requirements of modern life. To implement the concept of decent housing and meet housing needs, it is necessary to ensure public access to socially acceptable housing. The study aims to develop strategic concepts for the development of residential architectural environments in Iraq through the development of socially acceptable living environment standards and to identify problems related to informal housing. The study presents the conditions faced by the state when solving its problems in providing housing for the population.

Keywords: *living environment, home form, housing policy, informal housing, analysis.*

REFERENCES

1. Yaqub M. Open Source Architecture : Redefining Residential Architecture in Islamabad. School of Architecture, Art, and Historic Preservation Theses and Projects, 2017. Pp. 28–62.
2. Al-hafith O. et al. Research article. A systematic assessment of architectural approaches for solving the housing problem in Iraq. *Front. Archit. Res.* 2018. No 24 May. Pp. 3–12.
3. Shakhin Zh.B.-M. The conditions for the formation of low-rise residential buildings for high-density urban development (for example, Iraq). [Usloviya formirovaniya maloetazhnyh zhilyh domov dlya vysokoplotnoj gorodskoj zastroyki (na primere Iraka).]. Abstract. diss. ... cand. Architecture. M.: Moscow Architectural Institute, 1993. 33 p. (rus)
4. Ghaffarianhoseibi A., Berardi U., Dahland N.D. the Essence of Malay Vernacular Houses : Analysis of the Socio-Cultural. *Sustain. Cities Soc.* 2014. No January. Pp. 156–170.
5. Akalin A. et al. Architecture and engineering students' evaluations of house façades: Preference, complexity and impressiveness. *J. Environ. Psychol.* Elsevier, 2009. Vol. 29, No 1. Pp. 124–132.
6. Jiboye A.D. Significance of house-type as a determinant of residential quality in Osogbo, Southwest Nigeria. *Front. Archit. Res.* Elsevier, 2014. Vol. 3, No 1. Pp. 20–27.
7. Kar A.Z., Sarkar A. Exploring the role of Environment-Behavior Studies (EBS) in Residential Architecture-From Literature Review to Field Study // (IRJET). 2017. Vol. 04, No 11. Pp. 409–418.
8. Tiwari P., Rao J. Housing Markets and Housing Policies in India / ed. ADBI Working Paper Series N. 565. <http://hdl.handle.net/10419/161441>, 2016. No April 2016. 1–33 p.
9. A. J.Huda. National Housing Policies in Iraq- A Comparative Study. ,College of Engineering ,University of Baghdad, 2015. Vol. 180.
10. Al-Garaawi H.A.A.N. The Spatial Analysis of Random Residence phenomenon Reality in Al-Kufa City. University of Kufa, Department of Geography, 2014. 170 p.
11. Lien L.L. et al. Assessment and analysis of housing accessibility: adapting the environmental component of the housing enabler to United States applications. *J. Hous. Built Environ.* 2016. Vol. 31, No 3. Pp. 565–580.
12. Ali K.A., Raswol L.M. Planning for Affordable Housing Units in Duhok City. *ZJPAS.* 2017. Vol. 28, No 2016. Pp. 342–350.
13. Al-Fadl M. Th. The Social Influence of the Change of the House Form (Baghdad City). the institute of regional & urban planning in Baghdad university, 2005. 183 p.
14. Zhdanova I.V. Architectural methods for assessing and improving the consumer properties of a residential environment. [Arhitekturnye metody ocenki i sovershenstvovaniya potrebitel'skih svoystv zhiloy sredy.]. Abstract. diss. ... cand. Architecture. - Kazan: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 2013. 29 p. (rus)
15. Irani M., Armstrong P., Rastegar A. Evolution of Residential Building in Iran based on Organization of space. *Asian Cult. Hist.* 2017. Vol. 9, No 2. Pp. 46.
16. Onyemaechi P., Samy M. Motives and Motivation for Implementation of Public Private Partnerships (PPPs) in Housing Provision in Nigeria. *Mediterr. J. Soc. Sci.* 2016. Vol. 7, No 2. Pp. 149–157.
17. Hilber C.A.L., Schöni O. Housing Policies in the United Kingdom, Switzerland, and the United States: Lessons Learned. The Housing Challenge in Emerging Asia: Options and Solutions. Asian Deve / ed. Asian Development Bank Institute. Tokyo, Japan: <http://eprints.lse.ac.uk/68085/>, 2016. No October. Pp. 210–254.
18. Xue C.Q.L. Exploring the challenges to housing design quality in China: An empirical study. *Habitat Int.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 57, No September. Pp. 242–249.
19. Rahel, Amin M., Salah S. Evaluation of the Sustainable Aspects In Housing Sector To Overcome Housing Stress In Northern Iraq. 2019. Vol. 3, No 1. Pp. 67–81.
20. Meth p. Informal Housing, Gender, Crime And Violence: the Role of Desing in Urban South Africa. *Brit. J. Criminol.* 2017. Vol. 57, No January 2016. Pp. 402–421.

21. Zhang Y. Land Use Policy The credibility of slums : Informal housing and urban governance in India. Land use policy. Elsevier, 2017. No April. Pp. 1–15.

22. Suhad Kazem Al Moussawi. Urban Housing Planning and Social Consensus: A Field Study of the Neighborhood of the Warriors in Baghdad City. University of Baghdad, Institute of Urban and Regional Planning, 2011. 55 p.

23. Al-juboury H. M. The Phenomenon of Informal Settlements In Some Of Arabic Cities. The Urban and Regional Planning. University of Baghdad, 2008. 175 p.

24. Amado M. et al. Transformation of Informal

Settlements: Case of Keywords : Sustainability , Urban Planning , Parametric model , Informal Settlements , GIS. Creat. Commons CC BY. 2018. Vol. 18, No June. Pp. 1–18.

25. Adekoyejo B., Abraham A., Clement O. Emergence of Informal Housing : Implications for Development of Low-Cost Housing Delivery Strategies in Abeokuta , Nigeria. 2017. Vol. 6, No 3. Pp. 191–198.

26. Taha N. The Informal Areas and the ways Treated it with Planning Standard for Residential Areas. Institute of Urban and Regional Planning, University of Baghdad, 2010. 195 p.

Information about the authors

Al-Shaibani Alaa Abdali Hanoon, postgraduate of architecture. E-mail: al81aa4250@Gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, 46 Kostyukova st.

Shilo, Alexander V. Doctor of Art, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, 46 Kostyukova st.

Received in May 2019

Для цитирования:

Аль-Шайбани А.А., Шило А.В. Проблемы формирования жилой архитектурной среды в Ираке: исследования и литература // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-82-88

For citation:

Al-Shaibani A.A, Shilo A.V. Problems of formation residential architectural environment in Iraq: research and literature. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 82–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-82-88

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-89-96

Зарубская Е.О.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: ez555@list.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕНТРОВ УЛИЧНОГО СПОРТА ДЛЯ УСЛОВИЙ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА-ЮГРЫ

Аннотация. Современная теоретическая база уличного спорта в России требует разработки рекомендаций по проектированию архитектурных объектов в соответствии с актуальной практикой. Новые мастер-планы, основанные на единой теоретической модели сети объектов уличного спорта, позволят восполнить пропущенные типологические звенья и расширить реализацию архитектурного и градостроительного потенциала в структуре городов. Результаты исследования содержат элементы Трехуровневой модели Единой сети объектов уличного спорта для Российской Федерации и предусматривают следующие ступени для реализации:

- внутри страны в целом, с грамотным распределением между регионами,
- внутри каждой отдельно взятой территории,
- внутри населенного пункта.

Особую значимость в России должно приобрести равномерное распределение объектов уличного спорта в северных регионах, где преодоление влияния экстремальных условий проживания каждым без исключения жителем является одной из ежедневных задач, которая требует соответствующих компенсаций.

Предложенная концепция внедрения Единой системы размещения центров уличного спорта на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры содержит 3 модели для вертикального тиражирования: – от маломасштабного до крупного проекта; и 4 модели для горизонтального внедрения, представляющие собой центры уличного спорта:

- «ориентированные на развитие спорта высших достижений»,
- «ориентированные на развитие массового спорта»,
- «рекреационные»,
- «градообразующие».

Ключевые слова: теоретическая модель, единая сеть, центр уличного спорта, Россия уличный спорт.

Введение. Спорт в истории человечества стал первой реализованной идеей создания всемирного культа [1]. Слово «спорт» происходит от английского «disport» – забавляться, давать себе волю, шалить, развлекаться; «disport yourself» – получать удовольствие, в особенности от физической активности [2]. «Уличный спорт» становится наилучшим воплощением концепции «чистого спорта», в котором физическая активность, нацеленная на сохранение здоровья или получение удовольствия [3], отодвигает идею соревнования на другой план и в значительной степени превращает спорт в искусство [4].

В то время как большая часть мирового населения проживает в городах и подвержена стрессу и монотонности [5], а идея Пьера де Кубертена не реализуется в полной мере (возвышенные цели не достигаются ввиду коррупционных и допинговых скандалов [6]; вектор развития спорта от красоты и благородства честной победы, обусловленных единством духа, души и тела [7], смещается к потреблению); – в фокусе внимания на мировой спортивной сцене оказывается уличный спорт [8]. Свободный от жестких правил и поощряющий всестороннюю самореализацию,

«уличный спорт» представляет собой живое взаимодействие [9] различных направлений спортивной активности с целью всестороннего освоения постоянно изменяющегося урбанизированного ландшафта [10].

Рост мирового рынка уличного спорта обусловлен и такими факторами, как появление новых направлений, развитие деловых и спортивных инноваций, рост населения среднего класса, смещение предпочтений потребителей в сторону улучшения здоровья и внешности [11]. Государственная поддержка в области здравоохранения и спорта Российской Федерации, повсеместное усложнение, многослойность, вариативность урбанизированной среды, ускорение городской жизни, наличие разнообразного оборудования и средств для катания, а также появление персонализированных программ непрерывно дополняют рост рынка [12].

Высокие инвестиционные затраты на открытие пилотных центров уличного спорта, отсутствие общероссийской концепции теоретической модели уличного спорта, неполнота нормативной документации и подходов для проектирования, малоподвижный образ жизни будет препятствовать росту рынка. Однако ожидается, что в

ближайшее время влияние движущих факторов превзойдет влияние ограничений.

Объект исследования – теоретические модели центров уличного спорта в условиях региона Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Цель исследования состоит в выявлении типов многофункциональных центров уличного спорта, направленных на раскрытие потенциала объектов в условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Задача исследования заключается в рассмотрении региональной специфики размещения и проектирования объектов уличного спорта в северных регионах на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Методология. Этап сбора эмпирических данных стартовал в октябре 2017 г. и продолжался до января 2020 г. Эмпирическая база представлена 512 опрошенными, ответы которых были дифференцированы по характеристикам пользовательского опыта: от ролевой модели до зрителя. Применен общенаучный системный подход, аналитический метод исследования, метод статистического анализа результатов проведенного автором социологического опроса. Выявление особенностей современного пользовательского опыта всех категорий городских жителей Югры с экспертным интервьюированием представителей уличного спорта позволило учесть интересы региона при проектировании архитектуры объектов уличного спорта.

Основная часть. *Уличный спорт* представляет собой совокупность социальных отношений и видов деятельности, организуемых внутри урбанизированного ландшафта, в том числе в специализированных учреждениях, в соответствии с потребностями основных групп спортсменов, занимающихся выбранным видом или видами уличного спорта с целью всестороннего освоения городского пространства через проведение социальных, тренировочных мероприятий и соревновательной деятельности, (где урбанизированный ландшафт – это естественный ландшафт, преобразованный человеком за счёт городской архитектуры и инфраструктуры).

Согласно интерактивным данным «Ramp Map: World Skatepark Map» – в США (237), Великобритании (52) и Франции (27) находится сегодня более 70 % совокупного количества объектов уличного спорта (452). Соотношение в мире закрытых и открытых объектов уличного спорта составляет 1 : 20. По мнению американских специалистов, Россия и Бразилия сегодня являются наиболее перспективными странами для строительства крупных закрытых объектов уличного спорта.

Несмотря на то, что темпы роста обеспеченности объектами уличного спорта в городах России значительно ниже необходимых, этнография современных российских городов предполагает массовое распространение новых типов зданий.

Уличный спорт в Российской Федерации (наша страна занимает приблизительно 1/9 часть суши [13]), должен рассматриваться, прежде всего, как единая система, – мощный актив в масштабе всего государства, отдельно взятого региона, населенного пункта, архитектурного объекта, каждый из которых представляет собой универсальную теоретическую модель для реализации, – таким образом, меры по созданию отдельных точечных объектов уличного спорта не являются исчерпывающими. Лидирующие позиции в сфере точечного развития уличного спорта сегодня занимают такие города как Москва (Street hall), Санкт-Петербург (Жесть), Красноярск (Sportex), Ярославль (Ярбатут), однако ни один из закрытых объектов не был зарегистрирован на государственном уровне в соответствии со своим прямым назначением, что подтверждает необходимость и своевременность применения системного подхода в развитии архитектуры уличного спорта.

За последние 70 лет вне архитектуры возникло более чем 50 новых направлений уличного спорта, большинство из которых связано с катанием. Восполнение пропущенных звеньев в архитектурной типологии объектов уличного спорта призвано решить проблему нехватки пространств для профессиональной подготовки и социальной защиты перспективных спортсменов.

Взаимодействие различных направлений спортивной активности, связанных с катанием, являются самыми зрелищными, востребованными и сложными в организации, поэтому, ключевой комбинацией при формировании нового типа здания, центра уличного спорта, рекомендуются скейтбординг, велосипедный спорт – BMX, скутеринг, роллер-спорт, которые в наибольшей степени отвечают всемирной концепции «постспорта», тесно связанного с процессами глобализации и внедрением в городскую среду инновационного оборудования и технологий.

Однако, если в России сегодня и появляются объекты, предусматривающие наличие в своем составе отдельных залов для занятий некоторыми направлениями уличного спорта, то единая система организации пространства в таких сооружениях продолжает демонстрировать принципы традиционной спортивной архитектуры с изолированными друг от друга функциональными блоками, – пространства для катания начинаются и заканчиваются исключительно в границах стен изолированных друг от друга выделен-

ных залов. Конфигурации зон для катания предусматривают преимущественно ортогональную систему выстраивания траекторий движения, не поощряя обширных вариаций. В связи с отсутствием единой концепции развития уличного спорта, адаптированной к реализации в нашей стране, использование классических типологических моделей спортивных объектов в архитектуре уличного спорта в значительной степени подавляет дух свободы, первооткрывательства, взаимодействия с урбанизированной средой в уже на уровне архитектурных и градостроительных решений.

Три уровня Единой сети объектов уличного спорта:

- внутри страны в целом, с грамотным распределением между регионами,
- внутри каждой отдельно взятой территории,
- внутри населенного пункта;

с архитектурной точки зрения предполагают возможности для свободного прочтения и создания самодостаточных уникальных объектов национального масштаба с учетом местной неординарной специфики.

Первый уровень Единой сети объектов уличного спорта на территории Российской Федерации, предлагаемый исследованием, включает прежде всего северные регионы, занимающие более 70 % территории всей страны. Здесь каждый из 25 млн. человек (более 17,8 % населения России [14]), ежегодно испытывает на себе влияние экстремальных условий проживания, которые требуют соответствующих компенсаций.

Строительство центров уличного спорта в городской архитектурной среде целесообразно увязывать с государственной градостроительной политикой муниципального образования, региона и страны, – единство комплексной концепции реализации стратегии социально-экономического развития, схемы территориального планирования и бюджета на всех уровнях, – обеспечивает качественное воплощение стратегических замыслов по развитию уличного спорта в целом [15].

Рассмотрим реализацию Второго уровня Единой сети объектов уличного спорта на территории Российской Федерации на примере Ханты-Мансийского Автономного округа – Югры. Расчёты необходимой обеспеченности и доступности по объектам уличного спорта регионального и местного значения в соответствии с региональными нормативами градостроительного проектирования связаны с развитием планировочного каркаса. Программа размещения центров уличного спорта на территории одного региона предполагает выбор сразу нескольких городов. Предпочтение при формировании новых элементов в

структуре отдается городам-лидерам, в соответствии с интенсивностью их освоения и существующими магистральными транспортными связями, с учётом природных планировочных осей и сети имеющейся спортивной инфраструктуры.

Широтное направление планировочного каркаса может быть усилено программным объединением четырех городов окружного значения, которое включает в себя автомобильный, железнодорожный и водный пути через Пермь, – Ханты-Мансийск (с численностью населения 99 тыс. чел.), – Нефтеюганск (125 тыс.), – Сургут (348 тыс.), – Нижневартовск (271 тыс.), – в Томск. Ханты-Мансийск является планировочным центром первого ранга – это административный центр автономного округа, транспортно-логистический центр, центр культурного, социального, экономического развития. Сургут и Нижневартовск отнесены к планировочным центрам второго ранга. Сургут представляет собой крупный торгово-промышленный центр, административный, агломерационный центр, насыщенный экономическими, социальными функциями. Нижневартовск – промышленный, административный, агломерационный центр, расположен в восточной части автономного округа, на пути в Томскую область.

Стратегия организации сбалансированной системы объектов уличного спорта на самых ранних этапах планирования предполагает устойчивое развитие сети, состоящей из двух групп компонентов: узловых объектов уличного спорта – открытых, крытых и интегрированных зданий, сооружений и комплексов, и соединительных объектов линейной или облачной инфраструктуры уличного спорта, замыкающих в непрерывную цепь все узловые элементы. Региональная специфика размещения объектов уличного спорта в северных регионах с дискомфортными природно-климатическими условиями предполагает преимущественное распространение закрытых узловых объектов (центров уличного спорта). Устойчивая модель размещения в отдельного населенного пункта должна состоять не менее чем из трех центров уличного спорта. Уровень объектов модели зависит от масштаба и значения населенного пункта, и может быть определен комбинацией:

1. Международный «Крупномасштабный проект центра уличного спорта высших достижений» (с вместимостью до 7 – 12 тыс. зрителей, этажностью от 4-х этажей);

2. Национальный «Среднемасштабный проект центра для профессионального развития уличного спорта» (до 3 тыс. зрителей, этажностью от 3-х этажей);

3. Местный «Маломасштабный проект центра массового развития уличного спорта» (до 500 зрителей).

Инвестиционные потоки интеллектуального капитала движутся от проектов более высокого уровня вниз, - во встречном направлении, происходит возврат вложенных средств от реализации менее масштабных, более технологически проработанных и быстро окупаемых проектов [16]. Взаимный обмен интеллектуальным и финансовым капиталом обеспечивает возможность сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности при создании высокотехнологичных спортивных сооружений как в рамках отдельно взятого города, так и региона в целом [17]. Вертикальное и горизонтальное тиражирование высокотехнологичных спортивных сооружений в 4-х городах Югры, – Ханты-Мансийске, Сургуте, Нижневартовске и Нефтеюганске, – призвано реализовать синергетический потенциал новой градостроительной системы и укрепить широтное направление планировочного каркаса региона. Таким образом, первым этапом в Ханты-Мансийском Автономном округе – Югре может быть запланировано строительство до 12-ти крытых центров уличного спорта, как минимум один из которых - международного уровня.

Первый этап комплексного градостроительного развития уличного спорта в Ханты-Мансийском Автономном округе – Югре предполагает усиление прежде всего широтного направления планировочного каркаса региона в четырех городах – Ханты-Мансийске, Сургуте, Нижневартовске, Нефтеюганске. Строительство в каждом городе не менее 3-х крытых центров уличного спорта, один из которых имеет статус международного, может обеспечить выполнение сверхзадач по гармонизации и взаимоувязке спортивной деятельности региона и России в целом.

III. Общие характеристики моделей третьего, архитектурного, уровня Единой сети объектов уличного спорта внутри городов России можно объединить в 4 основных категории:

- модель первая «малые центры уличного спорта»: местное значение;

- модель вторая «средние центры уличного спорта»: районное/городское значение; многофункциональность и комплексный характер использования; структуры (в основном спортивная, рекреационная и культурно-массовая функции);

- модель третья «крупные центры уличного спорта»: городское/региональное/национальное значение; многофункциональность (соревновательные и тренировочные спортивные функции, рекреационные, культурные и иные обществен-

ные функции); гибридизация спортивной и зрительской функций, принципиальная гибкость и сценарность пространства, экологичность/ресурсо- и энергосбережение;

- модель четвертая «крупнейшие центры уличного спорта»: международное значение; гибридизация всех функций с целью воспроизведения атмосферы аутентичного городского и природного пространства, слияние урбанизированной, культурной и спортивной среды, сценарность, принципиальная гибкость, адаптируемость к новым потребностям; полифункциональность; экологичность/ресурсо- и энергосбережение.

Инициация формирования третьего уровня Единой сети объектов уличного спорта на территории Российской Федерации в качестве составной части структурных элементов населенных мест, от самых начальных ступеней до крупнейших общегородских и загородных объектов, в том числе Олимпийских комплексов предлагает и создание новой Классификации универсальных центров уличного спорта по основному назначению, которая включает:

- «ориентированные на развитие спорта высших достижений» с 75–90 % пространств спортивного назначения,

- «ориентированные на развитие массового спорта» с 70–85 % пространств спортивного назначения,

- «рекреационные» с 60–75 % пространств спортивного назначения,

- «градообразующие» с 50–65 % пространств спортивного назначения.

Центр уличного спорта в северных городах представляет собой интегрированный в городскую среду интеллектуальный архитектурный объект нового типа с крытой спортивной зоной, объединяющей воздушное пространство, архитектуру и ландшафт, с целью круглогодичного освоения через возможность занятий широким диапазоном новых дисциплин. Планировочная структура предусматривает слияние в одном объекте уличного спорта типологических моделей театра и стадиона. Модели, «ориентированные на развитие спорта высших достижений» и «ориентированные на развитие массового спорта», типологически тяготеют в большей степени к схеме стадиона, модели «рекреационные» и «градообразующие» - проявляют в большей степени типологию театров. Для всех 4-х предложенных вариантов универсальных центров уличного спорта характерны закольцованность, единство всех внешних и внутренних спортивных маршрутов, сценарность пространств, интенсификация функций. Функциональная схема представленного исследованием нового типа здания - центра уличного спорта, содержит в себе две группы единых,

взаимоувязанных между собой спортивных пространств для различных дисциплин уличного спорта, сопровождаемых на всех этапах зрительными зонами. В архитектурном отношении закрытые объекты уличного спорта демонстрируют укрупнение масштаба открытой архитектуры, превращение интровертного градостроительного плана в экстравертный.

Развитие спортивного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в соответствии с мировыми трендами и национальными ценностями позволит усилить способность к физической и психологической адаптации общества и создать лучшие условия для реализации отдельно взятой личности.

Выводы. Все в мире говорит о будущем перерождении спорта. Связь различных направлений через молниеносное изобретение, трансформацию, непрерывное слияние, разветвление, наложение концепций существующих спортивных дисциплин и взаимосвязанность этих изменений с усложнением городского креативного пространства уже нельзя игнорировать. Новейший виток эволюции объектов уличного спорта находится в режиме постоянной трансформации.

Глобальная концепция уличного спорта уже включает в себя более 65-ти выявленных в исследовании видов и дисциплин уличного спорта, а также направлений активного досуга, связанных преимущественно с катанием, однако система строительства единой инфраструктуры уличного спорта в мастер-планы развития городов до настоящего времени на территории Российской Федерации не была разработана.

Общая концепция распространения уличного спорта основывается на создании единой сети, комбинирующей две группы объектов - узловых (центров уличного спорта) и соединительных, которые подразделяются, в свою очередь, на линейные (трассы для однонаправленного движения) и облачные (пространства для катания с перемещениями в различных направлениях), - представляя собой единую городскую спортивную сцену.

Результаты исследования содержат Трехуровневую модель Единой сети объектов уличного спорта для Российской Федерации и предусматривают следующие ступени для реализации:

- внутри страны в целом, с грамотным распределением между регионами,
- внутри каждой отдельно взятой территории,
- внутри населенного пункта.

По итогам 2018 года доля населения, систематически занимающихся физической культурой и спортом составила 39,8 % (54,2 млн. человек)

[19], – 8 % от общей численности населения регулярно занимается нетрадиционными, в том числе уличными, видами спорта. Особую значимость в России должно приобрести равномерное распределение объектов уличного спорта по северным регионам, где преодоление влияния экстремальных условий проживания на каждого жителя является одной из ежедневных задач и требует соответствующих компенсаций. Расширение доступности объектов уличного спорта среди всех возрастов и социальных групп населения, «не оставляя никого», лежит в основе повестки дня в области справедливости [20]. Наиболее предпочтительным для северных регионов с дискомфортными природно-климатическими условиями является распространение закрытых компактных узловых объектов.

Основные группы характеристик новой типологии зданий - центров уличного спорта, - можно объединить в 4-х теоретических моделях, в соответствии с масштабом объекта:

- модель первая «малые центры уличного спорта»,
- модель вторая «средние центры уличного спорта»,
- модель третья «крупные центры уличного спорта»,
- модель четвертая «крупнейшие центры уличного спорта».

Предложенная в исследовании концепция пилотного внедрения *Единой системы размещения центров уличного спорта на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры* содержит первые 3 модели для вертикального тиражирования: – от маломасштабного до крупного проекта; и 4 модели для горизонтального внедрения, представляющие собой центры уличного спорта:

- «ориентированные на развитие спорта высших достижений»,
- «ориентированные на развитие массового спорта»,
- «рекреационные»,
- «градообразующие».

Динамично развивающиеся города мира в архитектуре центров уличного спорта находят колоссальный ресурс и возможности для преобразования городской среды [18]. Включение строительства единой инфраструктуры уличного спорта в мастер-планы развития городов предоставляет возможности к созданию новых интеллектуальных архитектурных объектов для долгосрочных инвестиций с целью всестороннего оздоровления населения и комплексного повышения качества городской среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The visionary founder of the modern Olympic Games. Lausanne: International Olympic Committee. 2020. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: <http://www.olympic.org/pierre-de-coubertin>. (дата обращения: 03.02.2020).
2. Disport. Cambridge Dictionary: Cambridge University Press. 2020. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: <http://www.dictionary.cambridge.org/ru/словарь/англо-русский/disport?q=Disport>. (дата обращения: 03.02.2020).
3. Sport. Cambridge Dictionary: Cambridge University Press. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: http://www.dictionary.cambridge.org/ru/словарь/англо-русский/sport_1?q=Sport. (дата обращения: 03.02.2020).
4. Зарубская Е.О. «Уличный спорт» как специфический объект проектирования // Системные технологии. 2018. № 28. С. 108–112.
5. World Population Prospects 2019 – Highlights. United Nations. 2019. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf. (дата обращения: 03.02.2020).
6. Kayzer B. Ethical Aspects of Doping and Anti-Doping. Thesis of Swansea University. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.serval.unil.ch/resource/several:BIB_B9C6372028C7.P001/REF. (date of treatment: 03.02.2020).
7. Reardon CL., Hainline B., Miller Aron C., Baron D. Mental health in elite athletes: International Olympic Committee consensus statement // British Journal of Sports Medicine. 2019. № 5. Pp. 667–699.
8. Zarubskaya E.O. Street sports center as a new type of public building // Themed collection of papers from international conferences by Scieuro. Scieuro. 2018. March. Pp. 26–30.
9. Zarubskaya E.O. The genesis of the social and cultural changes in the street sports architecture // Themed collection of papers from international conferences by HNRI «National development». HNRI “National development”. 2018. December. С. 143–145.
10. Зарубская Е.О. Современные тенденции развития типологии центров уличного спорта. Вестник Евразийской науки. 2018. № 3. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/57SAVN318.pdf>. (дата обращения: 03.02.2020).
11. Fitness and Recreational Sports Centers Market by Type and Age Group – global Opportunity Analysis & Industry Forecast, 2017–2023. ResearchAndMarkets.com. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/2nz3t1/global_fitness?w=4 (дата обращения: 03.02.2020).
12. Fitness and Recreational Sports Centers Market by Type and Age Group – global Opportunity Analysis & Industry Forecast, 2017–2023. ResearchAndMarkets.com. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/2nz3t1/global_fitness?w=4 (дата обращения: 03.02.2020).
13. Россия в цифрах. Федеральная служба государственной статистики. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/rusfig/rus18.pdf (дата обращения: 03.02.2020).
14. Россия в цифрах. Федеральная служба государственной статистики. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/rusfig/rus18.pdf (дата обращения: 03.02.2020).
15. Расширенное заседание президиума Госсовета по вопросам улучшения жилищных условий населения и формирования благоприятной городской среды. Президент России. 2019. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/59817> (дата обращения: 03.02.2020).
16. Фомкин С.В. Формирование структурно-параметрической модели сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности при производстве и строительстве высокотехнологичных спортивных сооружений // Transport business in Russia. 2012. № 6. С. 9–12.
17. Фомкин С.В. Формирование структурно-параметрической модели сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности при производстве и строительстве высокотехнологичных спортивных сооружений // Transport business in Russia. 2012. № 6. С. 9–12.
18. Glenney B., Mull S. Skateboarding and the Ecology of Urban space. Journal of sport and social issues. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Safari. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6269152> (дата обращения: 03.02.2020).
19. Доклад о роли субъектов Российской Федерации и муниципальных образований в развитии физической культуры, спорта и туризма. Министрство спорта Российской Федерации. 2019. [Электронный ресурс]. Систем. требования: MicrosoftWord. URL: <http://www.minsport.gov.ru/2019/doc/Doklad.docx> (дата обращения: 03.02.2020).

20. Accessibility and Development. Mainstreaming disability in the post-2015 development agenda. United Nations. 2018. [Электронный ресурс]. Систем. требования:

AdobeAcrobatReader. URL: http://www.un.org/disabilities/documents/accessibility_and_development.pdf (дата обращения: 03.02.2020).

Информация об авторах

Зарубская Елена Олеговна, аспирант. E-mail: ez555@list.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4.

Поступила в мае 2019 г.

© Зарубская Е.О., 2020

Zarubskaya E.O.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

E-mail: ez555@list.ru

THEORETICAL MODEL OF STREET SPORT OBJECTS IN KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG-YUGRA

Abstract. *The modern theoretical basis of street sports in Russia requires the working out of recommendations for the design of architectural objects in accordance with the relevant practice. New masterplans based on the theoretical model of the unified network of street sports objects will allow to fill the missing typological links and to expand the use of architectural and town-planning potential of the cities. The results of research contain the elements of a three-level model of street sports objects for Russian Federation and provide the following steps of implementation:*

- *inside the country with competent distribution by regions,*
- *inside of each separately considered area,*
- *inside of each settlement.*

The special importance in Russia should take the uniform distribution of street sports centers between the northern regions, where overcoming the influence of extreme living conditions by each and every resident is one of the daily tasks and requires appropriate compensations.

The proposed conception for the introduction of a unified system for the placement of street sports centers in the region contains 3 models for vertical replication (from small to large project) and 4 models for horizontal implementation of street sports objects:

- *«focused on big sports development»,*
- *«focused on mass sports development»,*
- *«recreational»,*
- *«city-forming».*

Keywords: *theoretical model, net, street sports center, Russia, street sports.*

REFERENCES

1. The visionary founder of the modern Olympic Games. Lausanne: International Olympic Committee. Safari. URL: <http://www.olympic.org/pierre-de-coubertin>. (date of treatment: 03.02.2020).
2. Disport. Cambridge Dictionary: Cambridge University Press. Safari. URL: <http://www.dictionary.cambridge.org/ru/словарь/англо-русский/disport?q=Disport>. (date of treatment: 03.02.2020).
3. Sport. Cambridge Dictionary: Cambridge University Press. Safari. URL: http://www.dictionary.cambridge.org/ru/словарь/англо-русский/sport_1?q=Sport. (date of treatment: 03.02.2020).
4. Zarubskaya E. «Street Sports» as a Specific Object of Architectural Design». [Ulichnij sport kak specificheskij ob'ekt arhitekturnogo proektirovaniya] System technologies. 2018. No. 28. Pp. 108–112. (rus)

5. World Population Prospects 2019 - Highlights. United Nations. 2019. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf. (date of treatment: 03.02.2020).

6. Kayzer B. Ethical Aspects of Doping and Anti-Doping. Thesis of Swansea University. 2018. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.serval.unil.ch/resource/several:BIB_B9C6372028C7.P001/REF. (date of treatment: 03.02.2020).

7. Reardon C.L., Hainline B., Miller Aron C., Baron D. Mental health in elite athletes: International Olympic Committee consensus statement. British Journal of Sports Medicine. 2019. № 5. Pp. 667–699.

8. Zarubskaya E. Street sports center as a new type of public building. Themed collection of papers

from international conferences by Scieuro. Scieuro. 2018. March. Pp. 26–30.

9. Zarubskaya, E. The genesis of the social and cultural changes in the street sports architecture. Themed collection of papers from international conferences by HNRI National development. HNRI “National development”. 2018. December. Pp. 143–145. (rus)

10. Zarubskaya E. The modern trends in the development of typology and system of street sports institutions. The Eurasian Scientific Journal. [Sovremennye tendencii razvitiya tipologii centrov ulichnogo sporta] 2018. № 3. AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/57SAVN318.pdf>. (date of treatment: 03.02.2020). (rus)

11. Fitness and recreational sports centers market by type and age group – global opportunity analysis and industry forecast, 2017–2023. ResearchAndMarkets.com. 2018. Safari. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/2nz3tl/global_fitness?w=4. (date of treatment: 03.02.2020).

12. Fitness and recreational sports centers market by type and age group – global opportunity analysis and industry forecast, 2017–2023. ResearchAndMarkets.com. 2018. Safari. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/2nz3tl/global_fitness?w=4. (date of treatment: 03.02.2020).

13. Russia in numbers. [Rossiya v cifrah] Federal State Statistics service. 2018. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/rusfig/rus18.pdf. (date of treatment: 03.02.2020). (rus)

14. Russia in numbers. [Rossiya v cifrah] Federal State Statistics service. 2018. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/rusfig/rus18.pdf. (date of treatment: 03.02.2020). (rus)

15. Enlarged meeting of the state council presidium on improving housing conditions and creating a favorable urban environment. [Rasshirennoe zasedanie prezidiuma Gossoveta po voprosam uluchsheniya zhilishchnyh uslovij naseleniya i

formirovaniya blagopriyatnoj gorodskoj sredy] President of Russia. Innopolis. 2019. Safari. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/59817>. (date of treatment: 03.02.2020). (rus)

16. Fomkin S. Formation of structural-parametric model for the balanced development of innovative and investment activities in the production of high tech sport facilities. [Formirovanie strukturno-parametricheskoj modeli sbalansirovannogo razvitiya innovacionnoj deyatel'nosti pri proizvodstve i stroitel'stve vysokotekhnologichnyh sportivnyh sooruzhenij] Transport business in Russia. № 6. 2012. Pp. 9–12. (rus)

17. Fomkin S. Formation of structural-parametric model for the balanced development of innovative and investment activities in the production of high tech sport facilities. [Formirovanie strukturno-parametricheskoj modeli sbalansirovannogo razvitiya innovacionnoj deyatel'nosti pri proizvodstve i stroitel'stve vysokotekhnologichnyh sportivnyh sooruzhenij] Transport business in Russia. № 6. 2012. Pp. 9–12. (rus)

18. Glenney B., Mull S. Skateboarding and the Ecology of Urban space. Journal of sport and social issues. 2018. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6269152>. (date of treatment: 03.02.2020).

19. Report on the role of regions of Russian Federation and municipalities in the development of physical education, sports and tourism. [Doklad o roli sub'ektov Rossijskoj Federacii i municipal'nyh obrazovanij v razvitii fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma] Ministry of sports of Russian Federation. 2019. MicrosoftWord. URL: <http://www.min-sport.gov.ru/2019/doc/Doklad.docx>. (date of treatment: 03.02.2020). (rus)

20. Accessibility and development. Mainstreaming disability in the post-2015 development agenda. United Nations. 2018. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.un.org/disabilities/documents/accessibility_and_development.pdf. (date of treatment: 03.02.2020).

Information about the authors

Zarubskaya, Elena O. Postgraduate student. E-mail: ez555@list.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Received in May 2019

Для цитирования:

Зарубская Е.О. Теоретическая модель центров уличного спорта для условий Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 89–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-89-96

For citation:

Zarubskaya E.O. Theoretical model of street sport objects in Khanty-Mansi autonomous okrug-Yugra. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 89–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-89-96

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru*

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПОЛИИМИДНЫХ ТРЕКОВЫХ (ЯДЕРНЫХ) МЕМБРАН

Аннотация. В работе представлены результаты исследования поверхностных, в том числе оптических свойств полиимидной пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны. Для исследования использовали полиимидные (трековые) ядерные мембраны производства ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip, Бельгия). Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм. Представлены данные ИК-спектроскопии. Показано, что уменьшение интенсивности пиков ИК-спектров мембраны по сравнению с пленкой является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления. Представлены данные влияния облучения тяжелыми ионами и химического травления полиимидной пленки для получения мембраны на гидрофобность/гидрофильность поверхности. Оптическую плотность пленки и трековых мембран определяли в диапазоне длин волн 350–950 нм. Измерения оптической плотности проводили с шагом в 50 нм. В работе показано, что несмотря на сильное различие спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки и трековой мембраны, оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно.

Ключевые слова: полиимидные мембраны, тяжелые ионы, химическое травление, оптическая плотность, краевой угол смачивания, морфология поверхности.

Введение. В настоящее время полимерные материалы используют для получения нанопористых трековых (ядерных) мембран. Трековые мембраны нашли широкое применение в процессах микрофильтрации для отделения вирусов, фракционирования коллоидных растворов и, в том числе, в медицине, в процедуре гемофильтрации и плазмафереза (отделение форменных элементов крови от плазмы). Также мембраны могут быть использованы для создания химических и биохимических сенсоров [1–6]. Много исследований посвящено применению трековых мембран для получения металлических структурированных реплик [7, 8]. Недавние исследования показали, что полиимидные трековые мембраны могут найти применение и в создании полимерных нанокомпозитов, в том числе для радиационно-защитных материалов авиационно-космического назначения [9–11].

Трековые мембраны изготавливают из различных полимеров (поликарбонат, полиэтилен-нафталат, полиэтилентерефталат, полиимид, полипропилен и поливинилиденфторид) [12–15]. Наибольшее распространение получили трековые мембраны на основе полиэтилентерефталата. Трековые мембраны из полиэтилентерефталата остаются на мировом рынке уникальными в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам [16]. Однако они характеризуются низкими физико-механическими свойствами, умеренной химической

стойкостью и плохой термостойкостью (до 120 °С). Что не позволяет их использовать в качестве матрицы для создания радиационно-защитных композитов, в том числе для космической промышленности. Полиимид является чрезвычайно перспективным материалом, производство и потребление которого быстро растет. Использование полиимида обусловлено его высокими механическими характеристиками, радиационной и химической стойкостью, а также широким температурным диапазоном эксплуатации (от -250 °С до +350 °С), что выгодно отличает его среди других полимерных материалов [17].

Для получения трековых мембран полимер в виде пленки облучается пучком тяжелых ионов (Ar, Kr, Xe и др.) и подвергается химическому травлению [18]. Путем изменения параметров облучения (энергии, интенсивности), режима травления, химической и фотохимической обработки перед травлением можно получать мембраны с различными видами пор [19, 20]. При облучении полиимида налетающий тяжелый ион, проходя через пленку, теряет свою энергию в основном на ионизацию. Энергия, которая передается полимерной мишени тормозящимся ионом, достаточна для разрыва большого числа химических связей в пределах траектории иона. Для полиимида, как представителя класса полимеров, характерно наличие большого числа связей, разрыв которых под действием тяжелых ионов преобразует его структуру.

Данная работа посвящена изучению изменения поверхностных, в том числе оптических свойств полиимидной пленки под влиянием облучения тяжелыми ионами и последующего химического травления с целью использования полученных данных для создания полимерных композитов с терморегулирующими свойствами авиационно-космического назначения.

Методология. Для исследования использовали полиимидные (трековые) ядерные мембраны с гидрофильной поверхностью (производитель ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip), Belgium). Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм.

Для оценки влияния облучения тяжелыми ионами и последующего химического травления

на структуру и оптические характеристики трековой мембраны проводилась ее сравнительная характеристика с исходной полиимидной пленкой марки ПМ-1 (производитель АО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова», Россия). Полиимидная пленка (ПМ-1) изготавливается методом полива из полиимидного лака АД-9103, полученного в растворе диметилформамида. Основной особенностью полиимидной пленки является способность сохранять механические и электроизоляционные свойства в широком интервале температур (от -250°C до $+350^\circ\text{C}$). **Основные физико-механические и электрические характеристики полиимидной пленки ПМ-1 представлены в таблице 1.**

Таблица 1

Основные физико-механические и электрические характеристики полиимидной пленки марки ПМ-1

№	Наименование характеристик	Показатели
1	Прочность при разрыве, МПа	150–180
2	Относительное удлинение при разрыве, %	70–90
3	Модуль упругости при растяжении, МПа	3000...3500
4	Электрическая прочность, кВ/мм	210...270
5	Диэлектрическая проницаемость (частота 10^3 Гц)	3,0...3,5
6	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^3 Гц	0,0025–0,003
7	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	10^{14} – 10^{15}
8	Коэффициент теплопроводности Вт/м·К	0,14–0,20
9	Удельная теплоемкость от 20 до 300°C , Дж/кг·К	10^{14} – 10^{15}
10	Коэффициент линейного теплового расширения (20 – 250°C)	$(20-30) \cdot 10^{15}$

Морфология поверхности пленок и трековых мембран была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (TESCAN MIRA 3 LMU).

ИК-Фурье спектры исследуемых веществ были получены с помощью ИК-спектрометра VERTEX 70. Исследования проводили в диапазоне волновых чисел 4000 – 400 см^{-1} .

Оптическую плотность пленок и трековых мембран определяли на фотоэлектрическом фотометре КФК-3 в диапазоне длин волн 350 – 950 нм . Измерения оптической плотности проводили с шагом в 50 нм . Образец пленки (мембраны) крепили на предметное стекло (размер $2,5$ на $3,5 \text{ см}$) и помещали в отделение, предназначенное для кюветы. В качестве сравнения использовали предметное стекло одинаковой толщины.

Для определения краевого угла смачивания исследуемых веществ на них наносили каплю дистиллированной воды 1 мл . Краевой угол смачивания θ определяли как угол между касательной, проведенной к поверхности смачивающей жидкости, и смачиваемой поверхностью твердого тела.

Основная часть. На рис. 1 представлены микрофотографии полиимидной пленки ПМ-1 (рис. 1 а, б) и полиимидной трековой мембраны (рис. 1 в, г). Анализ рис. 1 показал, что микроструктура поверхности исходной полиимидной пленки ПМ-1 гладкая и ровная без расслоений. Исследуемая полиимидная мембрана, полученная путем облучения тяжелыми ионами и последующей химической обработкой, обладает структурой с ярко выраженными круглыми порами и соответствует типичной микроструктуре трековой мембраны (рис. 1 в, г). Диаметр треков (пор) почти одинаков на всем участке мембраны и составляет около 200 нм . Поры расположены хаотично на всем участке съемки, а также можно заметить значительное перекрывание пор. По данным рис. 1 г была рассчитана концентрация треков, которая составляет $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, что соответствует концентрации заявленной производителем.

На рис. 2 представлены ИК-спектры полиимидной пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны. Данные, представленные на рис. 1 показали, что полученные ИК-спектры как пленки, так и мембраны имеют типичное строение для

полиимида. В ИК-спектрах пленки ПМ-1 и мембраны (рис. 2) имеются характеристические для имидного цикла полосы поглощения при 1380 см^{-1} и 1780 см^{-1} , отвечающие соответственно колебаниям связей C-N и C=O в имидном цикле. Наличие карбонильной группы C=O также выражено значительными по интенсивности пиками при 1728 см^{-1} . Также присутствует полоса поглощения при 876 см^{-1} , характерная для C-H колебаний, а проявление полос поглощения при 2840 и 2935 см^{-1} указывают на наличие в структуре полимера метоксигрупп с характерными валентными колебаниями связей C-H . Валентные колебания $-\text{C}=\text{C}-$ представлены двумя пиками при

1575 см^{-1} и 1505 см^{-1} . Сложноэфирная группировка проявляется на спектрах сильными по интенсивности полосами. Эфирные группировки имеют в ИК-спектре две полосы валентных колебаний: $-\text{C-O}$; C-C(O)-O и O-C-C соответственно. Колебания первой группировки на ИК-спектре пленок выражены очень интенсивной полосой поглощения при $1249\text{--}1276\text{ см}^{-1}$, а колебания второй группировки - сильным пиком при 1126 см^{-1} . Полоса поглощения в области $3400\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о присутствии связанных гидроксильных групп (химически связанной воды).

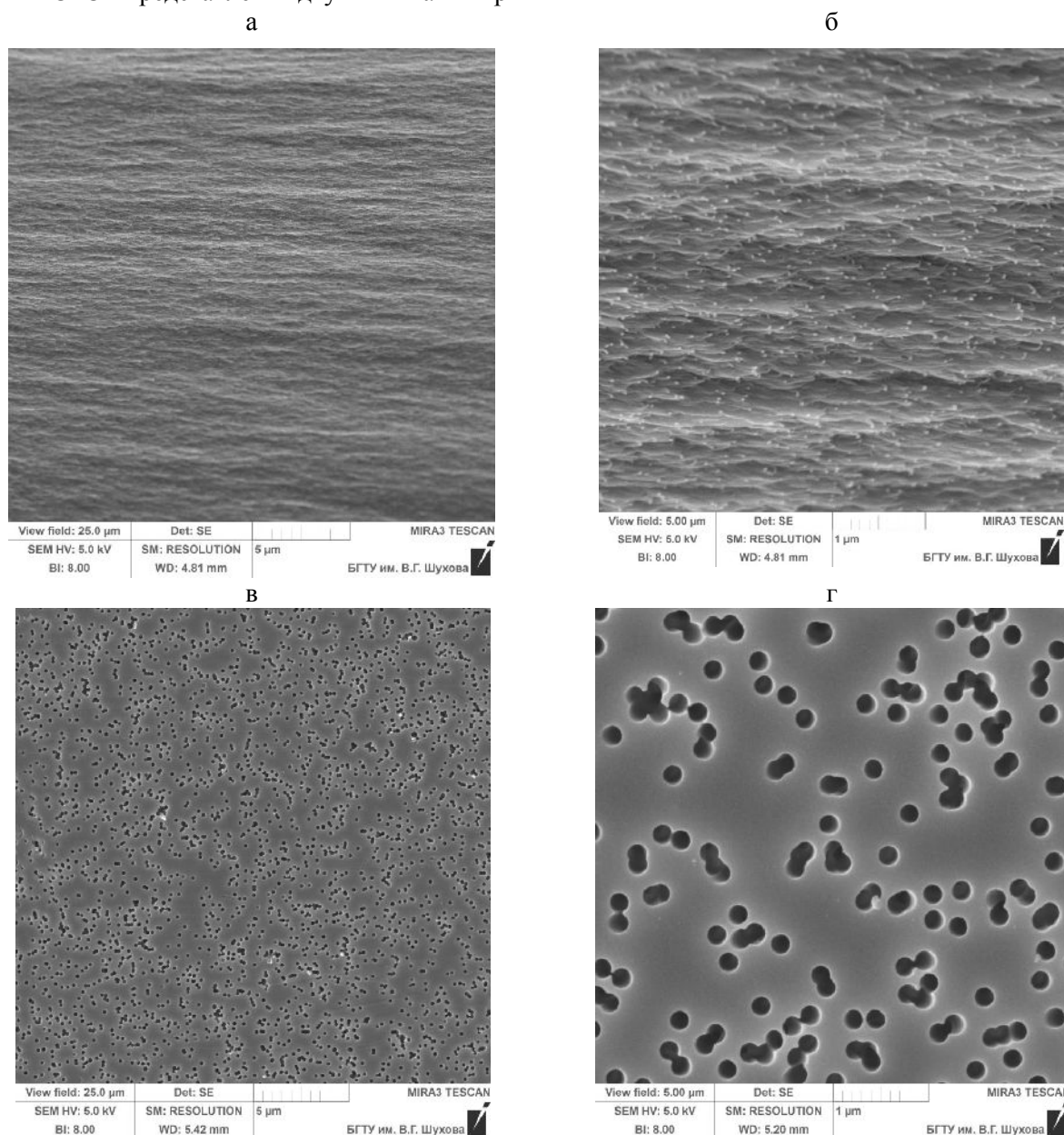


Рис. 1. Микрофотографии исходной пленки (а), облученной ионами Ag^{12+} (б) и полученной трековой мембраны (в, г)

Сравнительный анализ спектров пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны (рис. 2) показал, что интенсивность пиков мембраны

значительно меньше, чем у полиимидной пленки. Хорошо известно, что облучение полимеров потоком высокоэнергетичных частиц приводит к их

окислительной деструкции [21]. Поэтому уменьшение интенсивности пиков ИК-спектра является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления.

На рис. 3 показано изображение капли дистиллированной воды на поверхности полиимидной пленки МП-1 (а) и полиимидной трековой мембраны (б).

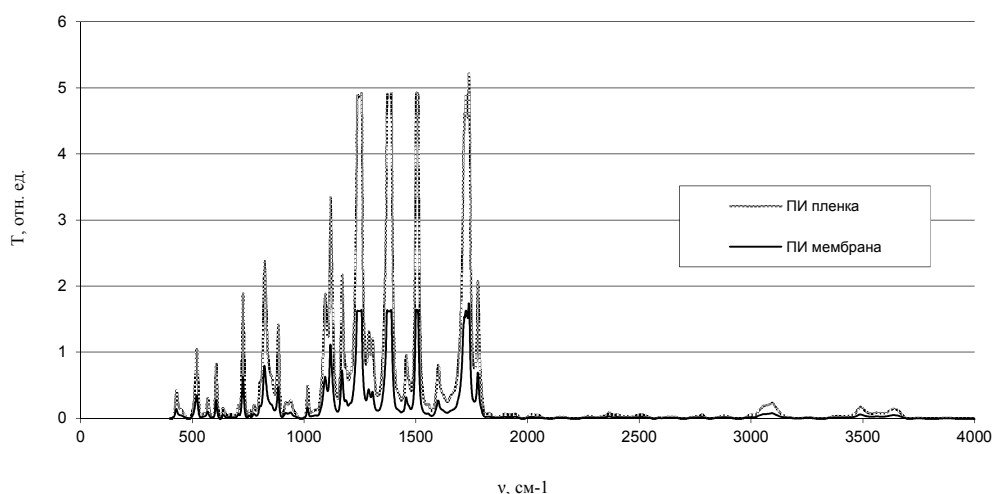


Рис. 2. ИК-спектры полиимидной пленки МП-1 и полиимидной трековой мембраны

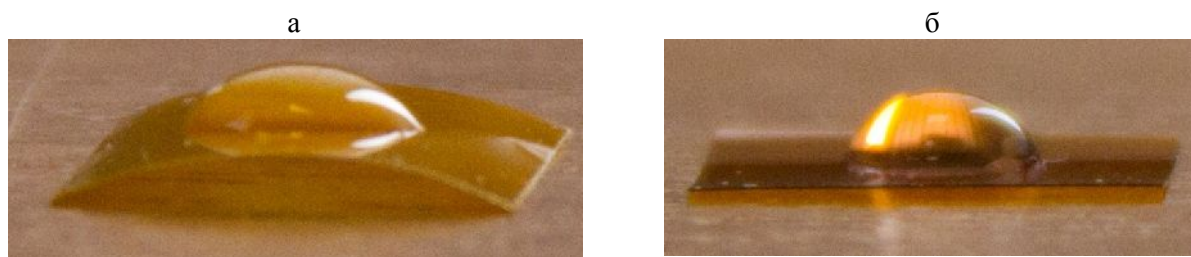


Рис. 3. Изображение капли воды на поверхности полиимидной пленки МП-1 (а) и полиимидной трековой мембраны (б)

Анализ данных на рис. 3 показал, что поверхность полиимидной пленки ПМ-1 обладает гидрофобной поверхностью (краевой угол смачивания $>90^\circ$), а поверхность полиимидной трековой мембраны обладает гидрофильной поверхностью (краевой угол смачивания $<90^\circ$). Таким образом, воздействие тяжелых ионов и химическое травление полиимидной пленки для получения трековой мембраны заметно снизило гидрофобность поверхности и поверхность приобрела гидрофильные свойства.

Для оценки изменения оптических характеристик пленки после воздействия тяжелых ионов и травления (для получения трековой мембраны) измеряли оптическую плотность образцов в широком диапазоне длин волн (350...950 нм). Оптическая плотность выражается формулой:

$$D = \log(I_0/I_1), \quad (1)$$

где D – оптическая плотность, I_0 – интенсивность падающего на пленку света; I_1 – интенсивность света, исходящего из данного участка пленки. Показатели оптической плотности большинства

пленок варьируются от 0.20 ($D_{\min}$) в наиболее прозрачных участках до 3.00 ($D_{\max}$) в самых черных [22, 23].

На рис. 4 приведены спектры полиимидной пленки ПМ-1 и трековой мембраны. Характер кривой спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 заметно отличается от кривой спектральной зависимости оптической плотности трековой мембраны. Наибольшее различие в кривых наблюдается в области $\lambda < 550$ нм. Спектр оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 имеет ярко выраженную полосу с максимумом при длине волны $\lambda = 450$ нм и резкий спад в области $\lambda = 400$ и 700 нм. Спектр оптической плотности трековой мембраны имеет ярко выраженные полосы с максимумами при длинах волн $\lambda = 500$ и 700 нм и резкий спад в области $\lambda = 600$ и 850 нм.

Как следует из анализа полученных результатов (рис. 4), воздействие тяжелых ионов и химическое травление полиимидной пленки для получения трековой мембраны оказывает заметное влияние на характер спектральной зависимости

оптической плотности (наблюдается появление новых полос поглощения). Изменение спектральной зависимости оптической плотности, вероятно, связано с увеличением интегрального коэффициента отражения в результате изменения показателя преломления и присутствия диффузного

отражения, возникающего на неоднородностях вблизи поверхности, формируемых при воздействии тяжелых ионов и химического травления полиимидной пленки.

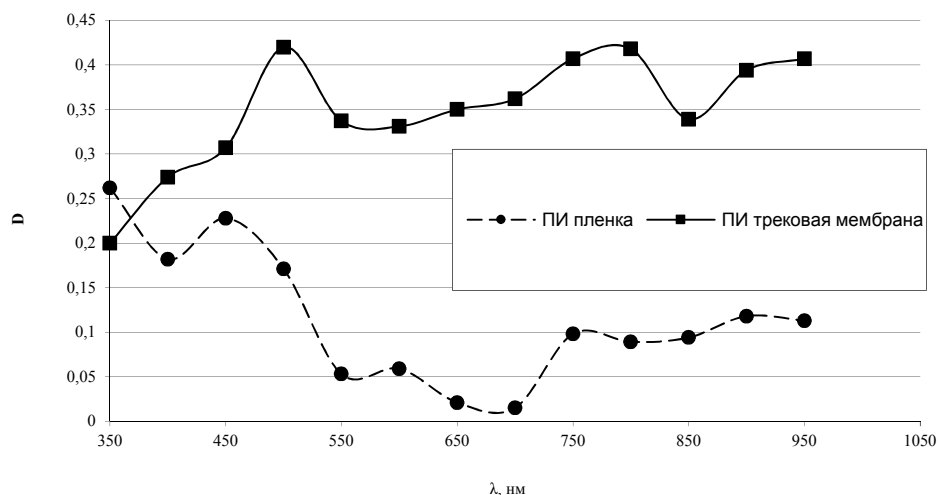


Рис. 4. Спектральная зависимость оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 и трековой мембраны

Несмотря на сильное различие спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки и трековой мембраны, видно, что оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно. Поэтому, можно рассматривать полиимидную трековую мембрану как нейтральный светофильтр с разной оптической плотностью для широкого диапазона от жесткой ультрафиолетовой области до мягкой рентгеновской с высоким уровнем блокировки ультрафиолетового и видимого фонового излучения [24].

Выводы. Микроструктура поверхности исходной полиимидной пленки ПМ-1 гладкая и ровная без расслоений. Исследуемая полиимидная мембрана, полученная путем облучения тяжелыми ионами и последующей химической обработкой обладает структурой с ярко выраженными грубыми порами и соответствует типичной микроструктуре трековой мембраны. Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм.

Сравнительный анализ спектров пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны показал, что интенсивность пиков мембраны значительно меньше, чем у полиимидной пленки. Уменьшение интенсивности пиков ИК-спектра является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления.

Поверхность полиимидной пленки ПМ-1 обладает гидрофобной поверхностью (краевой угол смачивания $>90^\circ$), а поверхность полиимидной трековой мембраны обладает гидрофильной поверхностью (краевой угол смачивания $<90^\circ$).

Оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно. Исследуемая трековая мембрана может найти применение в оптических приборах в качестве нейтрального светофильтра. Такие светофильтры будут обладать малой пропускной способностью ультрафиолетового и видимого фонового излучения.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10064).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимова Е.В., Прокофьева Ю.В., Казанцева Н.Н., Почиталкина И.А. Применение трековых мембран для очистки воды из природных водоемов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2009. Т. XXIII. №10 (103). С. 37–41.
2. Akapiev G.N., Dmitriev S.N., Erler B., Shirkova V.V., Schulz A., Pietsch H. Ion track membranes providing heat pipe surfaces with capillary structures // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003. Vol. 208. Pp. 133–136.

3. Козловский А.Л., Боргеков Д.Б., Здоровец М.В., Архангельски Е., Шумская Е.Е., Канюков Е. Ю. Применение трековых мембран в процессах прямого и обратного осмоса // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017. no. 1. Pp. 45–51.
4. Wang P., Wang X., Ling Y., Wang M., Ding S., Shen W., Wang Z., Wang Y., Liu F. Ultrafast selective ionic transport through heat-treated polyethylene terephthalate track membranes with sub-nanometer pores // *Radiation Measurements*. 2018. Vol. 119. Pp. 80–84.
5. Кравец Л.И., Гильман А.Б. Модифицирование трековых мембран с использованием низкотемпературной плазмы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 4–30.
6. Сырцова Д.А., Тепляков В.В., Кочнев Ю.К., Нечаев А.Н., Апель П.Ю., Adeniyi O.R., Petrik L. Структура и свойства трековых мембран из поли-4-метилпентена-1 // *Мембраны и мембранные технологии*. 2016. Т. 6. № 1. С. 17–26.
7. Danine A., Schoenleber J., Ghanbaja J., Montaigne F., Boulanger C., Stein N. Microstructure and thermoelectric properties of p-type bismuth antimony telluride nanowires synthesized by template electrodeposition in polycarbonate membranes // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 279. Pp. 258–268.
8. Zhu X.R., Wang C.M., Fu Q.B., Jiao Z., Wang W.D., Qin G.Y., Xue J.M. Preparation of Ag/Cu Janus nanowires: Electrodeposition in track-etched polymer templates // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. Vol. 356–357. Pp. 57–61.
9. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Manaev V.A., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V., Samoilova E.S. Multilayer coatings based on polyimide track membranes and nanodispersed lead // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 138, 105432.
10. Гумирова В.Н., Абдурашидова Г.С., Бедин С.А., Забалуева Н.П., Кувайцева М.А., Разумовская И.В. Особенности разрушения трековых мембран и композитов полимер/металл, полученных на их основе методом шаблонного синтеза // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57, вып. 2. С. 328–331.
11. Пат. 2681517, Российская Федерация, МПК 2017.01 G21F 1/12. Полимерный композит для защиты от ионизирующего излучения на основе трековых мембран и способ его получения / Павленко В.И., Лончаков Ю.В., Курицын А.А., Колобов Ю.Р., Черкашина Н.И., Манаев В.А. заявитель и патентообладатель Белгород.гос. техн. ун-т им. В.Г. Шухова; заявка № 2018117120, заявлено: 07.05.2018 г; опубликовано 07.03.2019.
12. Schauries D., Mota-Santiago P., Gilbert E.P., Kirby N., Trautmann C., Kluth P. Structure, morphology and annealing behavior of ion tracks in polycarbonate // *European Polymer Journal*. 2018. Vol. 108. Pp. 406–411.
13. Starosta W., Wawszczak D., Sartowska B., Buczkowski M. Investigations of heavy ion tracks in polyethylene naphthalate films // *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 31. Pp. 149–152.
14. Kakitani K., Koshikawa H., Yamaki T., Yamamoto S., Sato Y., Sugimoto M., Sawada Shin-ichi. Preparation of conductive layer on polyimide ion-track membrane by Ar ion implantation // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 355. Pp. 181–185.
15. He X., Sun Z., Wan C. Track polypropylene membrane based on irradiation with fragments from fission of uranium // *Radiation Measurements*. 2006. Vol. 41. Pp. 112–113.
16. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET Ion-Track Membranes Parameters // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 7. Pp. 866–871.
17. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. Polyimides: Thermally Stable Polymers. Plenum, New York, 2-nd edition, 1987. 125 p.
18. Волков В.В., Мчедlishvili Б.В., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // *Российские нанотехнологии*. 2008. Т. 3. №11-12. С. 67–101.
19. Власов С.В., Кочнев Ю.К., Виленский А.И. Влияние ориентационной вытяжки на геометрическую форму пор трековых мембран из полиэтилентерефталата // *Пластические массы*. 2010. № 9. С. 27–31.
20. Виленский А.И., Берёзкин В.В., Соболев В.Д. Формирование пор в полиимиде, облучённом высокоэнергетическими ионами и изучение свойств полученных мембран // *Коллоидный журнал*. 2009. Т. 71, № 4. С. 465–472.
21. Prasad S.G., De A., De U. Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films // *International Journal of Spectroscopy*. 2011. Article ID 810936.
22. Tsalaftoutas I.A., Papoutsis G.V., Maniatis P.N., Gogos K.A. Optical density variations in CT films and their effect on image quality // *British Journal of Radiology*. 2006. Vol. 941. Pp. 425–431.
23. Cosslett A., Cosslett V.E. The optical density and thickness of evaporated carbon films // *British Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 8. Pp. 374–376.
24. Mitrofanov A.V., Apel P.Y., Blonskaya I.V., Orelovitch O.L. Diffraction filters based on polyimide and poly(ethylene naphthalate) track

membranes // Technical Physics. 2006. Vol. 51. Pp. 1229–1234.

Информация об авторах

Черкашина Наталья Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Павленко Зоя Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: belpavlenko@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Манаев Владимир Алексеевич, научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: xxi-vek.2015@yandex.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлова Екатерина Сергеевна, студент (бакалавр) кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: terry.kot@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Сидельников Роман Владимирович, студент (бакалавр) кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2020 г.

© Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В., 2020

***Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Manaev V.A., Samoilova E.S., Sidelnikov R.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru*

STUDY OF THE STRUCTURE AND OPTICAL DENSITY OF POLYIMIDE TRACK (NUCLEAR) MEMBRANE

Abstract. The paper presents the results of a study of the surface and optical properties of the PM-1 polyimide film and the polyimide track membrane. For the study, polyimide (track) nuclear membranes manufactured by ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip, Belgium)) is used. The pore diameter is 200 nm, the pore density is $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1}$, and the thickness of the polyimide membrane is 25 μm . The data of IR spectroscopy are presented. It is shown that the decrease in the intensity of the peaks of the IR spectra of the membrane compared to the film is a consequence of the oxidative degradation of the polyimide after exposure to heavy ions and chemical etching. The data on the effects of heavy ion irradiation and chemical etching of a polyimide film to obtain a membrane on surface hydrophobicity / hydrophilicity are presented. The optical density of the film and track membranes is determined in the wavelength range of 350–950 nm. The optical density is measured in increments of 50 nm. It is shown that despite the strong difference in the spectral dependence of the optical density of the polyimide film and the track membrane, the optical density of the PM-1 film and the track membrane is quite low in the entire studied wavelength range and does not exceed 0.26 and 0.42, respectively.

Keywords: polyimide membranes, heavy ions, chemical etching, optical density, contact angle, surface morphology.

REFERENCES

1. Maksimova E.B., Prokofieva Yu.V., Kantseva H.H., Pochitalkina I.A. The use of track membranes for the purification of water from natural reservoirs [Primenenie trekovyh membran dlja ochistki vody iz prirodnyh vodoemov]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii*. 2009. T. XXIII. No.10 (103). Pp. 37–41. (rus)

2. Akapiev G.N., Dmitriev S.N., Erler B., Shirkova V.V., Schulz A., Pietsch H. Ion track membranes providing heat pipe surfaces with capillary

structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003. Vol. 208. Pp. 133–136.

3. Kozlovsky A.L., Borgekov D.B., Zdorovets M.V., Arkhangelsky E., Shumskaya E.E., Kanyukov E.Yu. Use of track membranes in the processes of direct and reverse osmosis [Primenenie trekovyh membran v processah prjamogo i obratnogo osmosa]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017. No. 1. Pp. 45–51. (rus)

4. Wang P., Wang X., Ling Y., Wang M., Ding S., Shen W., Wang Z., Wang Y., Liu F. Ultrafast selective ionic transport through heat-treated polyethylene terephthalate track membranes with sub-nanometer pores. *Radiation Measurements*. 2018. Vol. 119. Pp. 80–84.
5. Kravets L.I., Gilman A.B. Modification of track membranes using low-temperature plasma [Modificirovanie trekovyh membran s ispol'zovaniem nizkotemperaturnoj plazmy]. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tehnologiya*. 2018. T. 61. Vol. 4-5. Pp. 4–30. (rus)
6. Syrtsova D.A., Teplyakov V.V., Kochnev Yu.K., Nechaev A.N., Apel P.Yu., Adeniyi O.R., Petrik L. Structure and properties of track membranes made of poly-4-methylpentene-1 [Struktura i svoystva trekovyh membran iz poli-4-metilpentena-1]. *Membrany i membrannye tehnologii*. 2016. Vol. 6. No. 1. Pp. 17–26. (rus)
7. Danine A., Schoenleber J., Ghanbaja J., Montaigne F., Boulanger C., Stein N. Microstructure and thermoelectric properties of p-type bismuth antimony telluride nanowires synthesized by template electrodeposition in polycarbonate membranes. *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 279. Pp. 258–268.
8. Zhu X.R., Wang C.M., Fu Q.B., Jiao Z., Wang W.D., Qin G.Y., Xue J.M. Preparation of Ag/Cu Janus nanowires: Electrodeposition in track-etched polymer templates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. Vol. 356–357. Pp. 57–61.
9. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Manaev V.A., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V., Samoilova E.S. Multilayer coatings based on polyimide track membranes and nanodispersed lead. *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 138, 105432.
10. Gumirova V.N., Abdurashidova G.S., Bedin S.A., Zabalueva N.P., Kuvaitseva M.A., Razumovskaya I.V. Features of the destruction of track membranes and polymer / metal composites obtained on their basis by the template synthesis method [Osobennosti razrusheniya trekovyh membran i kompozitov polimer/metall, poluchennyh na ih osnove metodom shablonnogo sinteza]. *Fizika tverdogo tela*. 2015. T. 57. Vol. 2. Pp. 328–331. (rus)
11. Pavlenko V.I., Lonchakov Yu.V., Kuritsyn A.A., Kolobov Yu.R., Cherkashina N.I., Manaev V.A. Polymer composite for protection against ionizing radiation based on track membranes and method for its preparation. Patent RF, no. 2681517, 2018.
12. Schauries D., Mota-Santiago P., Gilbert E.P., Kirby N., Trautmann C., Kluth P. Structure, morphology and annealing behavior of ion tracks in polycarbonate. *European Polymer Journal*. 2018. Vol. 108. Pp. 406–411.
13. Starosta W., Wawszczak D., Sartowska B., Buczkowski M. Investigations of heavy ion tracks in polyethylene naphthalate films. *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 31. Pp. 149–152.
14. Kakitani K., Koshikawa H., Yamaki T., Yamamoto S., Sato Y., Sugimoto M., Sawada Shin-ichi. Preparation of conductive layer on polyimide ion-track membrane by Ar ion implantation. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 355. Pp. 181–185.
15. He X., Sun Z., Wan C. Track polypropylene membrane based on irradiation with fragments from fission of uranium. *Radiation Measurements*. 2006. Vol. 41. Pp. 112–113.
16. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET Ion-Track Membranes Parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 7. Pp. 866–871.
17. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. Polyimides: Thermally Stable Polymers. Plenum, New York, 2nd edition, 1987. 125 p.
18. Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I., Ivanchev S.S., Yaroslavtsev A.B. Membranes and Nanotechnology [Membrany i nanotehnologii]. *Rossijskie nanotehnologii*. 2008. T. 3. No. 11-12. Pp. 67–101. (rus)
19. Vlasov S.V., Kochnev Yu.K., Vilensky A.I. The influence of orientation drawing on the geometric shape of the pores of track membranes made of polyethylene terephthalate [Vliyanie orientacionnoj vytjazhki na geometricheskuju formu por trekovyh membran iz polijetilentereftalata]. *Plasticheskie massy*. 2010. No. 9. Pp. 27–31. (rus)
20. Vilensky A.I., Berezkin V.V., Sobolev V.D. Pore formation in a polyimide irradiated with high-energy ions and study of the properties of the resulting membranes [Formirovanie por v poliimide, obluchjonnom vysokojenergeticheskimi ionami i izuchenie svoystv poluchennyh membran]. *Kolloidnyj zhurnal*. 2009. Vol. 71, No. 4. Pp. 465–472. (rus)
21. Prasad S.G., De A., De U. Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films. *International Journal of Spectroscopy*. 2011. Article ID 810936.
22. Tsalaftoutas I.A., Papoutsis G.V., Maniatis P.N., Gogos K.A. Optical density variations in CT films and their effect on image quality. *British Journal of Radiology*. 2006. Vol. 941. Pp. 425–431.
23. Cosslett A., Cosslett V.E. The optical density and thickness of evaporated carbon films. *British Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 8. Pp. 374–376.
24. Mitrofanov A.V., Apel P.Y., Blonskaya I.V., Orelavitch O.L. Diffraction filters based on pol-

yimide and poly(ethylene naphthalate) track membranes. Technical Physics. 2006. Vol. 51. Pp. 1229–1234.

Information about the authors

Cherkashina, Natalia I. PhD, Assistant professor. E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pavlenko, Zoya V. PhD, Assistant professor. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Manaev, Vladimir A. Researcher. E-mail: xxi-vek.2015@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoilova, Ekatherine S. Bachelor student. E-mail: terry.kot@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sidelnikov, Roman V. Bachelor student. E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2020

Для цитирования:

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В. Изучение структуры и оптической плотности полиимидных трековых (ядерных) мембран // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105

For citation:

Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Manaev V.A., Samoilova E.S., Sidelnikov R.V. Study of the structure and optical density of polyimide track (nuclear) membrane. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-106-113

Трубицын М.А., *Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИОМИМЕТИЧЕСКОГО ГИДРОКСИАПАТИТА, ДОПИРОВАННОГО СИЛИКАТ- И КАРБОНАТ-АНИОНАМИ В ПРИСУТСТВИИ ЦИТРАТ-ИОНОВ

Аннотация. В настоящей работе методом химического осаждения из водных растворов синтезированы образцы биомиметического гидроксиапатита (БГАП), допированного силикат- и карбонат-анионами в присутствии цитрат-ионов. По результатам рентгенофазового анализ (РФА) все полученные материалы являются однофазными. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что порошки БГАП представляют собой совокупность агломерированных частиц близкой морфологии. Методом динамического светорассеивания подтверждено, что синтезированные БГАП состоят из агломератов размером 1–4 мкм. Для всех образцов с увеличением количества вводимых цитрат-ионов наблюдается уменьшение среднего размера кристаллитов и степени кристалличности. Установлено, что с увеличением концентрации цитрат-ионов содержание фракций агломератов размером 1–2 мкм возрастает с 70,16 до 75,43 %. Изучена растворимость образцов гидроксиапатита в физиологическом растворе ($\omega(\text{NaCl})=0,9\%$) при температурах 22 °C и 37 °C. Выявлено, что для всех синтезированных БГАП количество ионов Ca^{2+} , переходящих в жидкую фазу, возрастает. Максимальный выход ионов Ca^{2+} в физиологический раствор был зафиксирован у БГАП с наибольшим содержанием цитрат-ионов. Полученные результаты позволяют рассматривать синтезированные нами БГАП в качестве перспективного медицинского биоматериала для регенерации костных тканей.

Ключевые слова: биоматериал, гидроксиапатит, цитрат-ионы, биомиметический, биоактивность.

Введение. Биоматериалы на основе гидроксиапатита (ГАП) находят широкое применение в ортопедии и стоматологии, поскольку являются химическими аналогами биоапатита в костной ткани человека [1, 2].

Известно, что скорость резорбции имплантационного материала в зоне костного дефекта, наряду с биосовместимостью, считается ключевым показателем. Извлечение кальция и фосфатов из синтетического ГАП в зоне дефекта должно быть синхронизировано с их биологическим поглощением остеобластами в процессе реставрации костного матрикса, то есть резорбция биоматериала должна быть регулируемой. Большинство ранее разработанных синтетических ГАП отличаются низкой скоростью резорбции *in vivo*, что является их существенным недостатком [3]. До сих пор большинство научных работ было направлено на улучшение конструктивных и биологических характеристик подобных имплантатов путем получения двухфазных керамических композитов на основе гидроксиапатита и трикальциевого фосфата [4]. Вместе с тем, разработка биомиметического ГАП путем химического модифицирования позволяет регулировать биоактивность и биосовместимость таких биоматериалов и, на наш взгляд, является более перспективным подходом для решения данной проблемы [5–8].

Было обнаружено, что важную роль в формировании костной ткани играет кремний, особенно в процессе кальцификации молодых костей [9]. Как установлено в работах [10, 11], внедрение силикат-анионов в структуру ГАП усиливает и стимулирует активность остеобластов *in vitro* и способствует более высокой скорости растворения *in vivo*.

Также сообщалось, что биологический апатит природных костных тканей, дентина и эмали содержит в своей составе значительное количество карбонат-групп (до 8 % масс.) [12, 13]. Присутствие этих ионов в структуре приводит к снижению кристалличности и повышает растворимость как *in vitro*, так и *in vivo* [14–16].

Из литературы известно, что цитрат-ионы являются важным компонентом кости (1–2 % масс.) и входят в состав коллаген-апатитового комплекса [17, 18]. Предполагается, что возможный механизм действия цитрат-ионов заключается в их фиксации на гранях растущих кристаллов ГАП в межтканевой жидкости и, как следствие, препятствуют увеличению их размера [19].

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являлось получение наноразмерного биомиметического гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат-анионами (БГАП) в присутствии цитрат-ионов и исследование свойств синтезированных образцов.

Методология. В данной работе образцы БГАП, отвечающие формуле, $\text{Ca}_{10-z}(\text{PO}_4)_{6-x-y}(\text{CO}_3)_x(\text{SiO}_4)_y(\text{OH})_{2+x-y-2z} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ были синтезированы методом осаждения из водных растворов. Степень замещения фосфат-ионов карбонат- и силикат-анионами составляла $x=y=1$, а степень дефицитности кальция в данной системе $z=1$. Это соответствовало мольному соотношению $\text{Ca}/(\text{P}+\text{C}+\text{Si})=1,50$. В качестве прекурсора цитрат-ионов использовали 0,5М раствор лимонной кислоты. Также для сравнения был синтезирован БГАП в отсутствие цитрат-ионов. Полученным образцам с различной концентрацией цитрат-ионов присвоены индексы: БГАП0, БГАП1, БГАП5 и БГАП10 соответственно.

В качестве реагентов для приготовления систем использовали $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (х.ч.); $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (х.ч.а.); лимонную кислоту $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (х.ч.); $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (ч.); тетраэтоксисилан $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}(\text{TЭОС})$ (ос. ч.); NH_4OH (х.ч.а.) и дистиллированную воду.

Синтез образцов БГАП проводили по авторской методике при комнатной температуре ($t=25 \pm 2^\circ\text{C}$). К свежеприготовленному раствору нитрата кальция при интенсивном перемешивании добавляли 1, 5 и 10 мл раствора лимонной кислоты заданной концентрации, далее добавляли рассчитанное количество ТЭОС и карбонат аммония в форме растворов. Затем в реакционную смесь дозировали раствор гидрофосфата аммония. В процессе синтеза pH водной суспензии поддерживали на уровне $10 \pm 0,5$, используя раствор NH_4OH . Для завершения процесса кристаллизации фазы БГАП, реакционную смесь выдерживали в течение 24 часов. Полученный осадок отделяли от маточного раствора фильтрованием, промывали дистиллированной водой до $\text{pH} = 7$, сушили при температуре 120°C и далее измельчали в фарфоровой ступке до порошкообразного состояния.

Рентгенофазовый анализ (РФА) полученных образцов БГАП осуществляли на дифрактометре Rigaku Ultima IV с детектором D/teX Ultra с применением CuK_α излучения ($\lambda=1,54178\text{\AA}$). Параметры работы генератора: ускоряющее напряжение 40 кВ, ток трубки 40 мА. Съёмку проводили в интервале углов $20^\circ \leq 2\theta \leq 55^\circ$, шаг $0,02$, скорость регистрации спектров $3^\circ/\text{мин}$. Идентификацию фазового состава образцов осуществляли с помощью программы PDXL Qualitative Analysis при использовании баз данных ICDD (PDF 2008). Размер первичных кристаллитов определяли по формуле Селякова-Шеррера [20]:

$$D = \frac{n\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

где D – размер кристаллита; n – коэффициент, зависящий от формы частицы и близкий к 1; λ – длина волны излучения; β – полуширина дифракционной линии; θ – дифракционный угол.

Степень кристалличности X_s синтезированных образцов рассчитывали по данным рентгеновской дифрактограммы с использованием формулы [21]:

$$X_s = \frac{\sum A_c}{\sum A} \times 100\%, \quad (2)$$

где $\sum A_c$ – интегрированная площадь под всеми пиками кристаллов и $\sum A$ – общая интегрированная площадь под всеми пиками дифракции рентгеновских лучей при $2\theta = 20 \div 55^\circ$.

Объём элементарных ячеек $V_{\text{гекс}}$ рассчитывали по формуле [20]:

$$V_{\text{гекс}} = \frac{\sqrt{3}a^2c}{2}. \quad (3)$$

Морфологические исследования материалов проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении электронной пушки 5 кВ с использованием CCD камеры и применением преобразования Хуга. Увеличение изображения составляло до 20000 раз. Химический состав образцов БГАП определяли энергодисперсионным рентгеновским анализом (ЭДРА) на СЭМ с анализатором EDAX.

Размер частиц БГАП определяли на лазерном анализаторе Microtrac S3500 (США) методом динамического светорассеивания.

Растворимость образцов БГАП в физиологическом растворе ($\omega(\text{NaCl})=0,9\%$) оценивали по выходу в раствор катионов кальция Ca^{2+} , концентрацию которых в растворе определяли методом комплексонометрического титрования [22]. Данное исследование проводили при фиксированных температурах 22°C и 37°C . Образцы выдерживались в термостате различное время экспозиции, а максимальная продолжительность составляла 7 суток для достижения насыщения относительно твердой фазы.

Основная часть. Результаты РФА представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Согласно полученным данным, кристаллической фазой продуктов синтеза во всех случаях является гидроксиапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, относящийся к пространственной группе $\text{P6}_3/\text{m}$ гексагональной сингонии (PDF карта № 01-072-1243). Следует отметить, что других фаз не зафиксировано (рис 1).

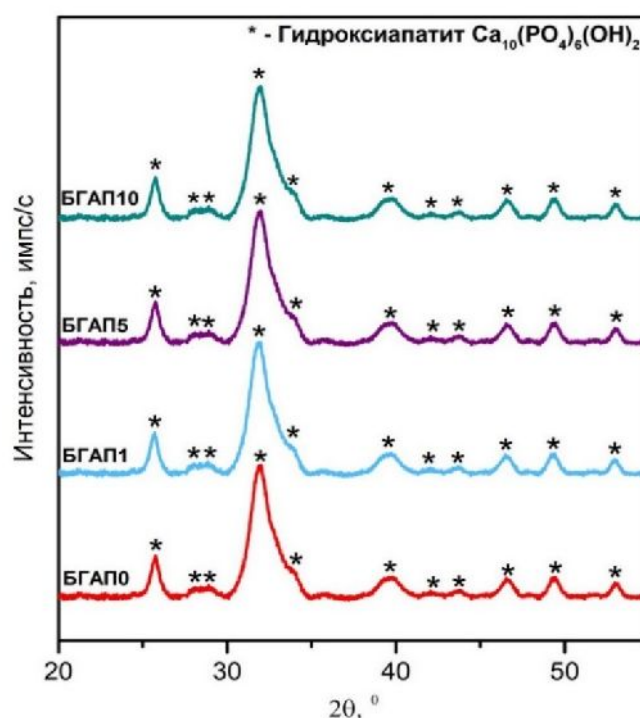


Рис. 1. Порошковые рентгеновские дифрактограммы образцов БГАП

Также, как следует из рис. 1, наблюдается определенное уменьшение интенсивности основных дифракционных пиков, что можно объяснить частичной аморфизацией гидроксиапатита вследствие внедрения в его структуру цитрат-ионов.

Из данных таблицы 1 видно, что размеры кристаллитов полученных образцов БГАП варьируются от 2,80 до 10,99 нм, что указывает на образование наноразмерного продукта. Для всех образцов с увеличением количества цитрат-

ионов, вводимых при синтезе, наблюдается уменьшение среднего размера кристаллитов и степени кристалличности. Это, на наш взгляд, подтверждает влияние цитрат-ионов на размер частиц ГАП. Значения параметров элементарной ячейки для изучаемых образцов практически не изменяются.

Результаты исследований дисперсного состава порошкообразных агломератов методом динамического светорассеивания представлены на рис. 2 и таблице 2.

Таблица 1

Характеристики полученных образцов по данным РФА

Образец	Фаза	Параметры элементарной ячейки, Å		Объем элементарной ячейки, Å ³	Средний размер кристаллитов, нм	Степень кристалличности, %
		<i>a</i>	<i>c</i>			
БГАП0	1	9,426	6,908	531,54	10,99	94,58
БГАП1	1	9,345	6,917	523,12	9,30	92,07
БГАП5	1	9,557	6,866	543,09	5,14	90,67
БГАП10	1	9,428	6,854	527,61	2,80	89,05

Как следует из рис. 2 и табл. 2, все синтезированные образцы БГАП являются полидисперсным продуктом и состоят из агломератов размером 1–4 мкм. С увеличением концентрации цитрат-ионов содержание фракций агломератов размером 1–2 мкм возрастает с 70,16 до 75,43 %, а содержание фракций 2–4 мкм уменьшается с 24,28 до 20,20 %. В то же время, содержание фракций 4–9 мкм и >10 мкм практически не изменяется.

Дополнительные исследования порошков БГАП были проведены методом сканирующей

электронной микроскопии. Результаты этих исследований представлены на рис. 3.

Анализ СЭМ – микрофотографий БГАП подтвердил, что все порошкообразные образцы представляют собой совокупность агломерированных частиц, которые имеют схожую морфологию и размеры, сопоставимые с данными, полученными методом динамического светорассеивания. Также подтверждается факт уменьшения размера агломерированных частиц с увеличением концентрации цитрат-ионов.

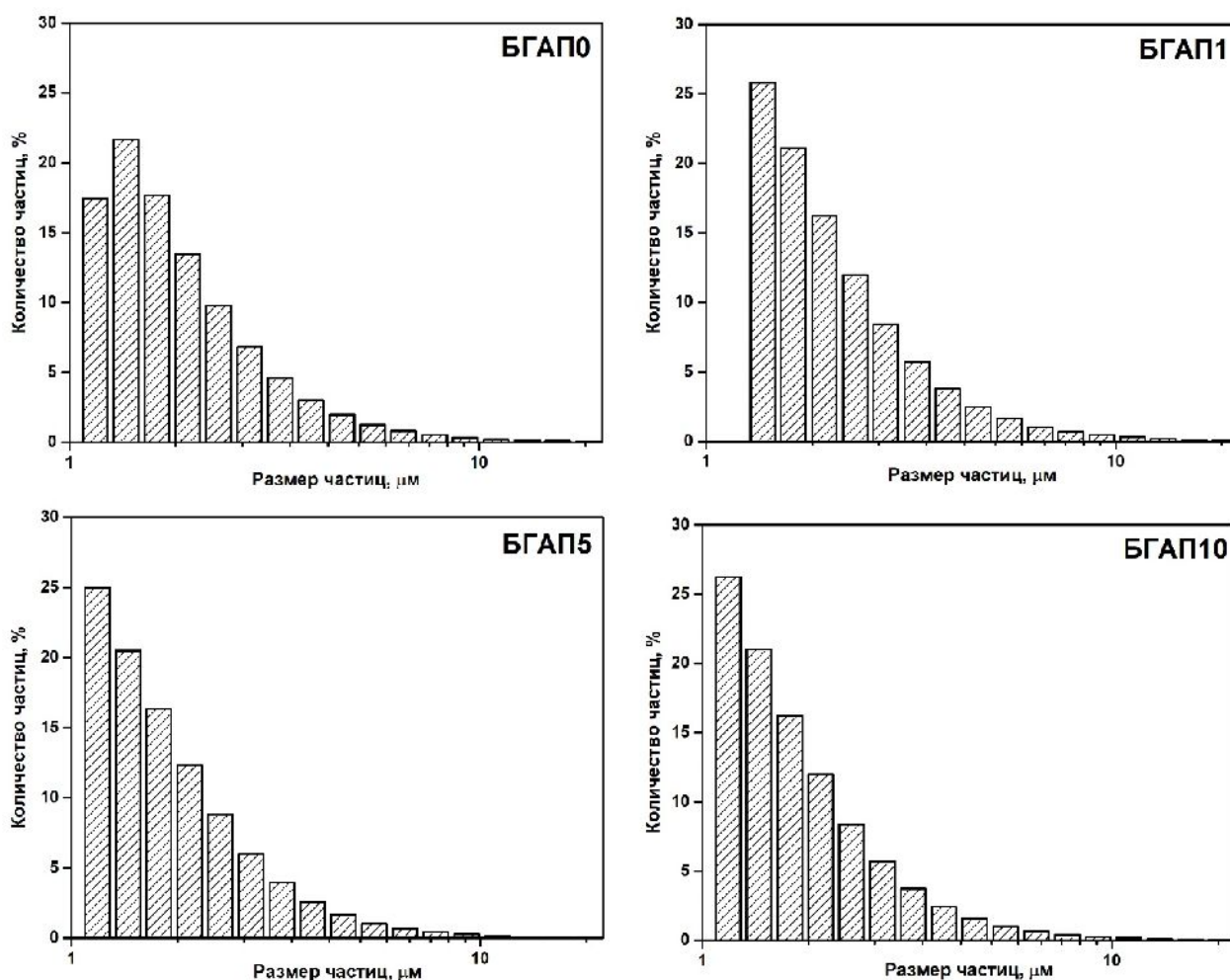


Рис. 2. Гистограммы дисперсного распределения частиц БГАП

Таблица 2

Гранулометрический состав агломерированных образцов БГАП

Образец	Размер агломератов, мкм			
	1-2	2-4	4-9	> 10
	Содержание фракций, %			
БГАП0	70,16	24,28	4,93	0,63
БГАП1	63,11	29,84	6,24	0,81
БГАП5	74,15	21,32	4,05	0,48
БГАП10	75,43	20,20	3,89	0,48

Как было отмечено ранее, важной характеристикой кальций-фосфатных материалов медицинского назначения является их биоактивность. В настоящей работе этот показатель для полученных образцов БГАП оценивали по способности к биорезорбции, т.е. интенсивности растворения в межтканевых жидкостях организма. Результаты исследования степени резорбции синтезированных образцов в физиологическом растворе ($\omega(\text{NaCl})=0,9\%$) при температурах $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 видно, что для всех синтезированных образцов БГАП количество ионов Ca^{2+} , переходящих в жидкую фазу при вы-

держивании материалов в физиологическом растворе, с повышением температуры с 22 до $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастает. Аналогичная зависимость наблюдается и в случае увеличения концентрации цитрат-ионов, добавляемых при синтезе БГАП. Такое поведение можно объяснить двумя факторами действия цитрат-ионов. С одной стороны, увеличение концентрации цитрат-ионов приводит к уменьшению размеров частиц, а с другой стороны - к увеличению степени его аморфизации. На наш взгляд, более существенным является вклад аморфизации. Максимальный выход ионов Ca^{2+} в физиологический раствор ($\omega(\text{NaCl}) = 0,9\%$) был зафиксирован у образцов БГАП с наибольшим содержанием цитрат-ионов.

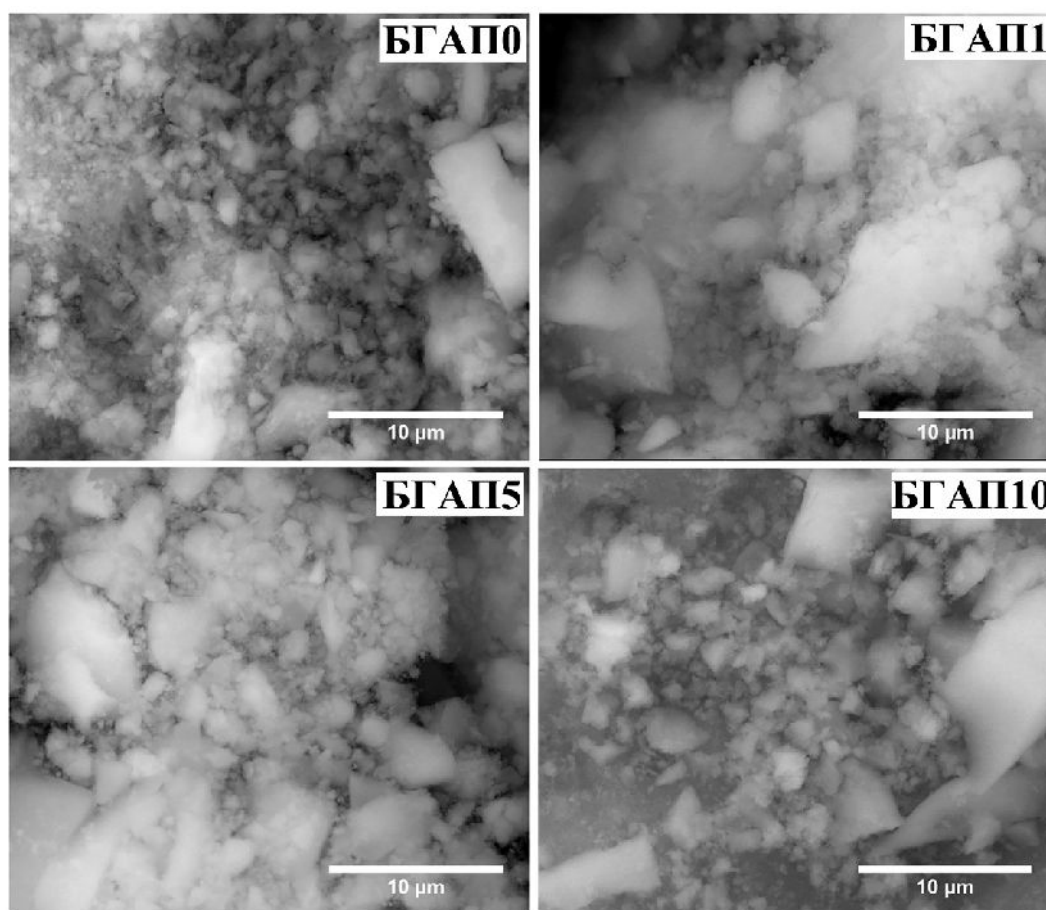


Рис. 3. СЭМ – микрофотографии порошков БГАП

Таблица 3

Степень резорбции полученных образцов БГАП в физиологическом растворе при pH = 7, ω(NaCl) = 0,9 %

Образцы	Концентрация ионов Ca^{2+} в физиологическом растворе, ммоль/л	
	22°C	37°C
БГАП0	1,3	1,55
БГАП1	1,7	2,35
БГАП5	2,4	2,85
БГАП10	4,05	4,6

Выводы. Методом осаждения из водных растворов получена серия однофазных образцов наноструктурного биомиметического гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат анионами в присутствии цитрат-ионов различной концентрации. Все порошкообразные БГАП представляют собой совокупность агломерированных частиц, которые имеют схожую морфологию и размеры. Установлено, что присутствие цитрат-ионов оказывает существенное влияние на размер частиц и биологическую активность синтезированных образцов.

Благодарности: работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ambrosio A. M., Sahota J. S., Khan Y., Laurencin C. T. A novel amorphous calcium phosphate polymer ceramic for bone repair: I. Synthesis and characterization // Journal of Biomedical Materials Research. 2001. № 3 (58). Pp. 295–301. doi: 10.1002/1097-4636(2001)58:3<295::aid-jbm1020>3.0.co;2-8.
2. Saeri M. R., Afshar A., Ghorbani M., Ehsani N., Sorrell C. C. The wet precipitation process of hydroxyapatite // Mater. Lett. 2003. № 24-25 (57). Pp. 4064-4069. doi: 10.1016/S0167-577X(03)00266-0.
3. Vallet-Regí M., Arcos D. Silicon substituted hydroxyapatites. A method to upgrade calcium phosphate-based implants // J Mater Chem. 2005. № 15 (15). Pp. 1509–1516. doi: 10.1039/B414143A.

4. Peña J. Hydroxyapatite, tricalcium phosphate and biphasic materials prepared by a liquid mix technique // *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. № 10 (23). Pp. 1687–1696. doi: 10.1016/S0955-2219(02)00369-2.
5. Šupová M. Substituted hydroxyapatites for biomedical applications: A review // *Ceram. Int.* 2015. № 8 (41). Pp. 9203–9231. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.03.316.
6. Dorozhkin S.V. Calcium Orthophosphate-Based Bioceramics and Biocomposites. Germany: Wiley-VCH Weinheim, 2016. 416 p. doi: 10.1002/9783527699315.
7. Kaygili O., Keser S., Kom M., Eroksuz Y., Dorozhkin S. V., Ates T., Ozercan I. H., Tatar C., Yakuphanoglu F. Strontium substituted hydroxyapatites: Synthesis and determination of their structural properties, in vitro and in vivo performance // *Mater. Sci. Eng. C*. 2015. Vol. 55. Pp. 538–546. doi: 10.1016/j.msec.2015.05.081.
8. Dorozhkin S.V. Calcium Orthophosphates in Nature, Biology and Medicine // *Materials*. 2009. № 2 (2). Pp. 399–498. doi: 10.3390/ma2020399.
9. Carlisle E.M. Silicon: a possible factor in bone calcification // *Science*. 1970. № 3916 (167). Pp. 279–280. doi: 10.1126/science.167.3916.279.
10. Porter A.E., Botelho C.M., Lopes M.A., Santos J.D., Best S.M., Bonfield W. Ultrastructural comparison of dissolution and apatite precipitation on hydroxyapatite and silicon-substituted hydroxyapatite in vitro and in vivo // *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2004. № 4 (69). Pp. 670–679. doi: 10.1002/jbm.a.30035.
11. Botelho C.M., Brooks R.A., Best S.M., Lopes M.A., Santos J.D., Rushton N., Bonfield W. Human osteoblast response to silicon-substituted hydroxyapatite // *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2006. № 3(79). Pp. 723–730. doi: 10.1002/jbm.a.30806.
12. Driessens F.C.M. The mineral in bone, dentin and tooth enamel // *Bull. Sociétés Chim. Belg*. 2010. № 8 (89). Pp. 663–689. doi: 10.1002/bscb.19800890811.
13. Rey C., Renugopalakrishnan V., Collins B., Glimcher M. J. Fourier transform infrared spectroscopic study of the carbonate ions in bone mineral during aging // *Calcif. Tissue Int.* 1991. № 4 (49). Pp. 251–258. doi: 10.1007/BF02556214.
14. Shepherd J.H., Shepherd D.V., Best S.M. Substituted hydroxyapatites for bone repair // *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2012. № 10 (23). Pp. 2335–2347. doi: 10.1007/s10856-012-4598-2.
15. Sprio S., Tampieri A., Landi E., Sandri M., Martorana S., Celotti G., Logroscino G. Physicochemical properties and solubility behaviour of multi-substituted hydroxyapatite powders containing silicon // *Mater. Sci. Eng. C*. 2008. № 1(28). Pp. 179–187. doi: 10.1016/j.msec.2006.11.009.
16. Murugan R., Ramakrishna S. Production of ultra-fine bioresorbable carbonated hydroxyapatite // *Acta Biomater.* 2006. № 2 (2). Pp. 201–206. doi: 10.1016/j.actbio.2005.09.005.
17. Hu Y.-Y., Rawal A., Schmidt-Rohr K. Strongly bound citrate stabilizes the apatite nanocrystals in bone // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2010. № 52 (107). Pp. 22425–22429. doi: 10.1073/pnas.1009219107.
18. Hu Y.-Y., Liu X. P., Ma X., Rawal A., Prozorov T., Akinc M., Mallapragada S. K., Schmidt-Rohr K. Biomimetic Self-Assembling Copolymer–Hydroxyapatite Nanocomposites with the Nanocrystal Size Controlled by Citrate // *Chem. Mater.* 2011. № 9 (23). Pp. 2481–2490. doi: 10.1021/cm200355n.
19. de Leeuw N.H., Rabone J.A.L. Molecular dynamics simulations of the interaction of citric acid with the hydroxyapatite (0001) and (011̄0) surfaces in an aqueous environment // *CrystEngComm*. 2007. № 12 (9). Pp. 1178–1186. doi: 10.1039/B710974A.
20. Cullity B.D., Weymouth J.W. Elements of X-Ray Diffraction // *Am. J. Phys.* 1957. № 6 (25). Pp. 394–395. doi: 10.1119/1.1934486.
21. Singh G., Singh S., Prakash S. Surface characterization of plasma sprayed pure and reinforced hydroxyapatite coating on Ti6Al4V alloy // *Surf. Coat. Technol.* 2011. № 20 (205). Pp. 4814–4820. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.04.064.
22. Шварценбах Г., Флашка Г. Комплексонометрическое титрование. М.: Изд-во Химия, 1970. 359 с.

Информация об авторах

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

Хоанг Вьет Хунг, аспирант кафедры общей химии. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

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

Поступила в январе 2020 г.

© Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В., 2020

Troubitsin M.A., *Hoang Viet Hung, Furda L.V.

Belgorod National Research University

*E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF BIOMIMETIC HYDROXYAPATITES DOPED BY SILICATE AND CARBONATE ANIONS IN THE PRESENCE OF CITRATE IONS

Abstract. In the present work, biomimetic hydroxyapatite (BHAP) doped with silicate and carbonate anions in the presence of citrate ions are synthesized by chemical precipitation from aqueous solutions. According to the results of X-ray phase analysis (XRD), all the obtained materials are single-phase. Scanning electron microscopy (SEM) demonstrates that BHAP powders are a collection of agglomerated particles with similar morphology. Dynamic light scattering confirms that the synthesized BHAPs consist of agglomerates 1–4 μm in size. For all samples, with an increase in the number of introduced citrate ions, decreases in the average crystallite size and degree of crystallinity are observed. With an increase in the concentration of citrate ions, the content of agglomerate fractions of 1–2 μm in size increases from 70.16 to 75.43 %. The solubility of hydroxyapatite samples in physiological saline ($\omega(\text{NaCl}) = 0.9\%$) at temperatures of 22 °C and 37 °C is studied. It is revealed that for all synthesized BHAPs, the amount of released Ca^{2+} ions into the liquid phase increases. The maximum yield of Ca^{2+} ions in physiological saline is recorded in BHAP with the highest content of citrate ions. The obtained results allow to consider the synthesized BHAP as a promising medical biomaterial for the regeneration of bone tissue.

Keywords: biomaterial, hydroxyapatite, citrate ions, biomimetic, bioactivity.

REFERENCES

1. Ambrosio A.M., Sahota J.S., Khan Y., Laurencin C.T. A novel amorphous calcium phosphate polymer ceramic for bone repair: I. Synthesis and characterization. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2001. Vol. 3 (58). Pp. 295–301. doi: 10.1002/1097-4636(2001)58:3<295::aid-jbm1020>3.0.co;2-8.
2. Saeri M.R., Afshar A., Ghorbani M., Ehsani N., Sorrell C.C. The wet precipitation process of hydroxyapatite. *Mater. Lett.* 2003. Vol. 24–25 (57). Pp. 4064–4069. doi: 10.1016/S0167-577X (03)00266-0.
3. Vallet-Regi M., Arcos D. Silicon substituted hydroxyapatites. A method to upgrade calcium phosphate-based implants. *J Mater Chem*. 2005. Vol. 15 (15). Pp. 1509–1516. doi: 10.1039/B414143A.
4. Peña J. Hydroxyapatite, tricalcium phosphate and biphasic materials prepared by a liquid mix technique. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 10 (23). Pp. 1687–1696. doi: 10.1016/S0955-2219(02)00369-2.
5. Šupová M. Substituted hydroxyapatites for biomedical applications: A review. *Ceram. Int*. 2015. Vol. 8 (41). Pp. 9203–9231. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.03.316.
6. Dorozhkin S.V. Calcium Orthophosphate-Based Bioceramics and Biocomposites. Germany: Wiley-VCH Weinheim, 2016. 416 p. doi: 10.1002/9783527699315.
7. Kaygili O., Keser S., Kom M., Eroksuz Y., Dorozhkin S.V., Ates T., Ozercan I.H., Tatar C., Yakuphanoglu F. Strontium substituted hydroxyapatites: Synthesis and determination of their structural properties, in vitro and in vivo performance. *Mater. Sci. Eng. C*. 2015. Vol. 55. Pp. 538–546. doi: 10.1016/j.msec.2015.05.081.
8. Dorozhkin S.V. Calcium Orthophosphates in Nature, Biology and Medicine. *Materials*. 2009. Vol. 2 (2). Pp. 399–498. doi: 10.3390/ma2020399.
9. Carlisle E.M. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science*. 1970. Vol. 3916 (167). Pp. 279–280. doi: 10.1126/science.167.3916.279.
10. Porter A.E., Botelho C.M., Lopes M.A., Santos J.D., Best S.M., Bonfield W. Ultrastructural comparison of dissolution and apatite precipitation on hydroxyapatite and silicon-substituted hydroxyapatite in vitro and in vivo. *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2004. Vol. 4 (69). Pp. 670–679. doi: 10.1002/jbm.a.30035.
11. Botelho C.M., Brooks R.A., Best S.M., Lopes M.A., Santos J.D., Rushton N., Bonfield W. Human osteoblast response to silicon-substituted hydroxyapatite. *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2006. Vol. 3 (79). Pp. 723–730. doi: 10.1002/jbm.a.30806.
12. Driessens F.C.M. The mineral in bone, dentin and tooth enamel. *Bull. Sociétés Chim. Belg*. 2010. Vol. 8 (89). Pp. 663–689. doi: 10.1002/bscb.19800890811.

13. Rey C., Renugopalakrishnan V., Collins B., Glimcher M. J. Fourier transform infrared spectroscopic study of the carbonate ions in bone mineral during aging. *Calcif. Tissue Int.* 1991. Vol. 4 (49). Pp. 251–258. doi: 10.1007/BF02556214.
14. Shepherd J. H., Shepherd D. V., Best S. M. Substituted hydroxyapatites for bone repair. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2012. Vol. 10 (23). Pp. 2335–2347. doi: 10.1007/s10856-012-4598-2.
15. Sprio S., Tampieri A., Landi E., Sandri M., Martorana S., Celotti G., Logroscino G. Physico-chemical properties and solubility behaviour of multi-substituted hydroxyapatite powders containing silicon. *Mater. Sci. Eng. C.* 2008. Vol. 1(28). Pp. 179–187. doi: 10.1016/j.msec.2006.11.009.
16. Murugan R., Ramakrishna S. Production of ultra-fine bioresorbable carbonated hydroxyapatite. *Acta Biomater.* 2006. Vol. 2 (2). Pp. 201–206. doi: 10.1016/j.actbio.2005.09.005.
17. Hu Y.Y., Rawal A., Schmidt-Rohr K. Strongly bound citrate stabilizes the apatite nanocrystals in bone. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2010. Vol. 52 (107). Pp. 22425–22429. doi: 10.1073/pnas.1009219107.
18. Hu Y.Y., Liu X.P., Ma X., Rawal A., Prozorov T., Akinc M., Mallapragada S. K., Schmidt-Rohr K. Biomimetic Self-Assembling Copolymer–Hydroxyapatite Nanocomposites with the Nanocrystal Size Controlled by Citrate. *Chem. Mater.* 2011. Vol. 9 (23). Pp. 2481–2490. doi: 10.1021/cm200355n.
19. de Leeuw N.H., Rabone J.A.L. Molecular dynamics simulations of the interaction of citric acid with the hydroxyapatite (0001) and (011 $\bar{0}$) surfaces in an aqueous environment. *CrystEngComm.* 2007. Vol. 12 (9). Pp. 1178–1186. doi: 10.1039/B710974A.
20. Cullity B.D., Weymouth J.W. Elements of X-Ray Diffraction. *Am. J. Phys.* 1957. Vol. 6 (25). Pp. 394–395. doi: 10.1119/1.1934486.
21. Singh G., Singh S., Prakash S. Surface characterization of plasma sprayed pure and reinforced hydroxyapatite coating on Ti6Al4V alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2011. Vol. 20 (205). Pp. 4814–4820. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.04.064.
22. Schwarzenbach G., Flaschka G. Complexometric titration [Комплексонометрическое титрование] Moscow: “Khimiya” Publishing House, 1970. 359 p. (rus)

Information about the authors

Troubitsin, Mikhail A. PhD, Professor. E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Hoang Viet Hung, Postgraduate student. E-mail: hung.hoangviet191290@gmail.com. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda, Liubov V. PhD, Assistant professor. E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received in January 2020

Для цитирования:

Трубицын М.А., Хоанг Вьет Хунг, Фурда Л.В. Синтез и исследование свойств биомиметического гидроксиапатита, допированного силикат- и карбонат-анионами в присутствии цитрат-ионов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 106–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-106-113

For citation:

Troubitsin M.A., Hoang Viet Hung, Furda L.V. Synthesis and investigation of biomimetic hydroxyapatites doped by silicate and carbonate anions in the presence of citrate ions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2020. No. 3. Pp. 106–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-106-113

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120

Титов Д.П.

Тульский государственный университет

E-mail: titovd1981@yandex.ru

РАБОТА РОТОРА В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ

Аннотация. Аппараты вихревого слоя могут выступать средствами интенсификации большинства процессов во многих случаях. Особенно эффективно применение этих аппаратов при производстве резиновых изделий, ускорения химических процессов, для приготовления исходных материалов в металлургии, использование в обогащительных процессах переработки руд, решения экологических проблем при очистке сточных вод и во многих других областях. Такое широкое применение возможно благодаря свойствам вихревого слоя, который обеспечивает помимо механического воздействия ещё и электрохимическое. Эффективность традиционных аппаратов данного класса можно повысить путем применения новой конструкции. Эта конструкция отличается наличием в рабочей зоне ротора, который активно влияет на электромагнитные процессы. Исследованию работы ротора в аппарате вихревого слоя посвящена данная статья. Исследование носит практический характер и заключается в изучении работы экспериментальной установки. Конструкция этой установки позволяет выявить закономерности в обозначенной области исследования. Это достигается использованием легкоъемных роторов различного диаметра, которые позволяют получать зазор между ротором и индуктором различной величины. Так же конструкция экспериментальной установки позволяет вводить в активную зону различное количество ферромагнитных элементов. Основным оценочным критерием при исследовании является коэффициент использования энергии ротором. Оценивая абсолютную величину этого коэффициента, был сделан вывод о бесперспективности классических аппаратов для механического воздействия на продукт. Результатами исследования является установление зависимости рабочих параметров от зазора между ротором и индуктором, а также количества ферромагнитных элементов в исследуемом аппарате.

Ключевые слова: аппарат вихревого слоя (АВС), опытная установка, исследование, моторный режим, электрические характеристики, реактивная мощность, исследуемые параметры.

Введение. Одним из методов интенсификации технологических процессов является комплексная обработка в аппарате вихревого слоя ферромагнитными частицами, за счет воздействия на них вращающегося электромагнитного поля [1, 2]. Использование принципа вихревого слоя позволяет интенсифицировать целый ряд технологических процессов [3, 4] за счет комплексного воздействия на обрабатываемые вещества активного перемешивания и диспергирования [5, 6, 7, 8, 9], акустической и электромагнитной обработки, трения, высоких локальных давлений, электролиза [10].

Основной недостаток аппаратов вихревого слоя как электрической машины заключается в плохом коэффициенте мощности [1] ($\cos\phi$), порядка 0,2–0,4. Это связано с большой долей реактивной мощности, которую эти аппараты потребляют. Реактивная мощность необходима на образование магнитного поля. Этот недостаток общий для всех аппаратов вихревого слоя, так как магнитное поле, генерируемое индуктором,

не замыкается на магнитопровод, а через ферромагнитные элементы рассеивается в пространстве [11]. Поскольку масса ферромагнитных элементов невысока, порядка 400 гр., то полноценным магнитопроводом они выступить не могут.

Реактивная мощность осложняет работу установки в составе электрической сети [12], поэтому её нужно компенсировать или уменьшать [13, 14]. Основным способом компенсации реактивной мощности является параллельное подключение соответствующей данной индуктивности ёмкости. При этом создаётся колебательный контур, в котором при определённой настройке может возникнуть резонанс [12]. Резонанс в параллельном контуре является резонансом напряжений и характерен тем, что потребление реактивной мощности из сети уменьшается, а в идеале становится равным нулю. Этот способ распространён в промышленности и до появления других электронных способов являлся основным. Компенсация реактивной мощности при индуктивном нагреве в печах и других промышленных установках.

Уменьшить реактивную мощность можно только совершенствованием АВС как электроустановки. Для этого необходимо магнитное поле замыкать на магнитопровод. В электродвигателях таким магнитопроводом является вращающийся ротор [12], поэтому $\cos \varphi$ асинхронных короткозамкнутых двигателей равен 0,9. Ротор в электродвигателях выполнен с минимальными зазорами, чтобы рассеивание магнитного поля было минимальным. Такая конструкция не подходит, потому что аппарат вихревого слоя является машиной, через которую должно проходить обрабатываемая среда. Это подразумевает наличие проходного сечения, то есть между ротором и индуктором должен присутствовать зазор. Предметом проведённого исследования является работа АВС в моторном режиме, с ротором, имеющим увеличенный зазор между индуктором и поверхностью ротора. С заполнением свободного зазора Н (рис. 4) различным количеством ферромагнитных элементов.

С точки зрения концентрации магнитной энергии наличие ротора является положительным моментом, так как позволяет обрабатывать продукт не во всём объёме индуктора, а только в строго определённом зазоре между индуктором и ротором.

Наличие вращающегося ротора так же полезно с точки зрения конструирования перерабатывающих машин на принципах аппаратов вихревого слоя. Это позволит приводить различные агрегаты: насосы, мешалки, дробилки от вала вращающегося ротора.

Методология. Для исследования работы ротора в активной зоне аппарата вихревого слоя разработана лабораторная установка [15, 16]. Общий вид установки представлен на рис. 1., устройство и состав представлены на рис. 2. Установка (рис. 2) состоит из индуктора 7, помещённого в корпус 8, в который герметично заделана труба 18 с фланцами. Корпус закреплён на радиаторе охлаждения 11, который соединён трубопроводами 19 с корпусом. Через трубопроводы 19 циркуляционным насосом 13 осуществляется циркуляция охлаждающего масла. Охлаждается радиатор установленным на него вентилятором 12. Радиатор 11 является основанием, на котором смонтированы все агрегаты установки. В корпус установлен термометр 17, по которому контролируется температура охлаждающего масла. К фланцам трубы 18 крепятся фланцы 14 с установленными в них подшипниками, на которых вращается вал 15. На последнем закрепляется ротор 9, помещённый в активную зону К индуктора 7. Фланцы 14 легко снимаются, что позволяет производить замену ротора 9. Между ротором 9 и трубой 18 вводятся ферромагнитные элементы 10.

Шайбы 16 препятствуют разлёту ферромагнитных элементов 10 при работе установки.



Рис. 1. Установка для исследования работы АВС (общий вид)

Для затормаживания ротора установка оснащена устройством, позволяющим измерять момент при торможении ротора.

Тормозное устройство состоит: из тормозного барабана 1, закреплённого на валу 15 ротора 9. Тормозной барабан охватывают накладки, закреплённые на планках тормозного рычага 2. Сила нажима накладок на барабан контролируется загрузочным устройством 3. Создающийся момент на плече L загружает весы 5, которые и измеряют этот момент. Устройство 6 позволяет управлять работой весов. Упор 4 позволяет фиксировать положение рычага 2, тем самым разгружаются весы 5.

Основная часть. При выполнении исследования проводилась работа с пятью роторами рис. 3.

Роторы представляют собой металлическую болванку различного диаметра. Диаметры D роторов следующие: ротор 1 – D=80 мм, ротор 2 – D=70 мм, ротор 3 – D=50 мм, ротор 4 – D=30 мм, ротор 5 – D=18 мм. Учитывая, что диаметр внутренней трубы 20 – 100 мм можно вычислить зазор Н (рис. 2.).

$$H = \frac{100-D}{2} \quad (1)$$

Вычисляя по формуле (1), получаем зазор Н: ротор 1 – Н=10 мм, ротор 2 – Н=15 мм, ротор 3 – Н=25 мм, ротор 4 – Н=35 мм, ротор 5 – Н=41 мм.

Порядок проведения экспериментов.

При фиксированной частоте тока в 25, 50, 75, 100 Гц (что для 2-х полюсной обмотки равнозначно 1500, 3000, 4500, 6000 об/мин соответственно), подаваемой на индуктор установки, измерялись параметры: сила F на роторе, которую показывают весы загрузочного устройства [Кг],

частота вращения ротора n_1 [об/мин], ток потребляемый индуктором I [А], напряжение межфазное, подаваемое на индуктор U [В], мощность

электрическая потребляемая индуктором N_3 [кВт].

Замеряемые параметры фиксировались следующими приборами.

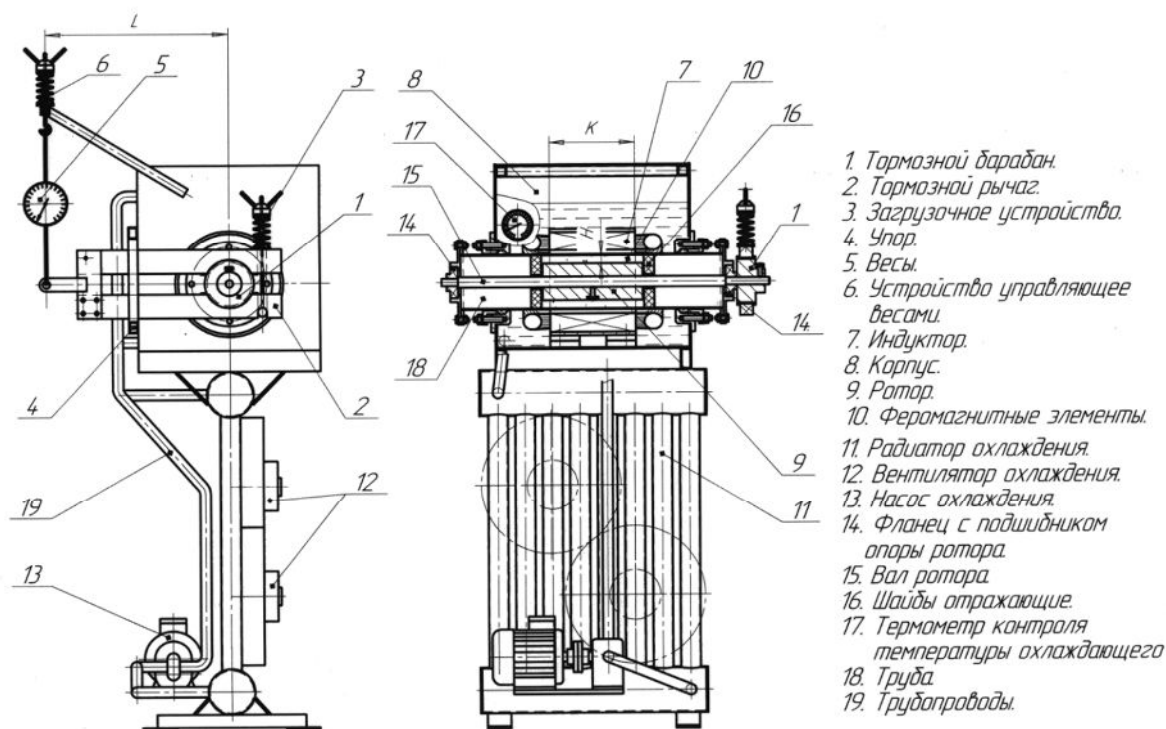


Рис. 2. Установка для исследования работы АВС (устройство и состав)

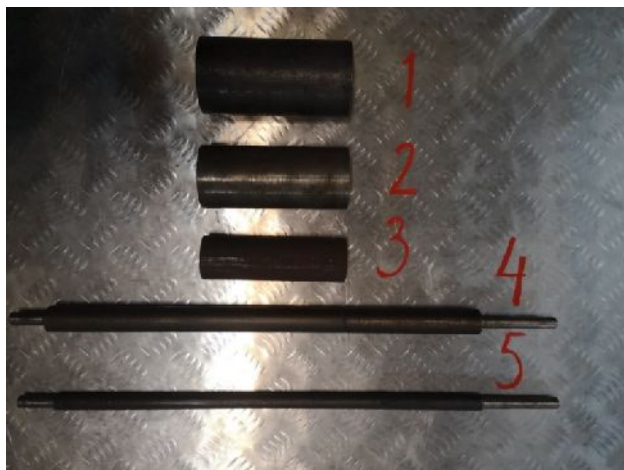


Рис. 3. Сменные роторы различного диаметра

Сила F – подвесными электронными весами, частота вращения n_1 – часовым тахометром, питание индуктора установки осуществляется от частотного преобразователя HYUNDAI N700E, электрические параметры I , U и N_3 фиксировались частотным преобразователем HYUNDAI N700E.

При каждом замере фиксировались также расчётные параметры, являющиеся производными замеренных параметров: скольжение S –

отставание вращения ротора от вращения магнитного поля,

$$s = \frac{n - n_1}{n} 100\% \quad (2)$$

мощность на роторе N – мощность, снимаемая с ротора с помощью тормозного устройства,

$$N = \frac{FLn_1}{6} = 0,048Fn_1 \quad (3)$$

где $L=0,29$ м – плечо загрузочного устройства, коэффициент использования энергии ротором,

$$k = \frac{N}{N_3} 100\% \quad (4)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{N_3}{\sqrt{3}IU} \quad (5)$$

Обрабатывая результаты экспериментов была выявлена зависимость коэффициента K использования энергии ротором, от зазора H между статором и ротором. Эта зависимость, для частот 25, 50, 75 и 100 Гц, приведена на рис. 4. Из рис. 4 видно, что с увеличением зазора H , коэффициент K очень сильно уменьшается.

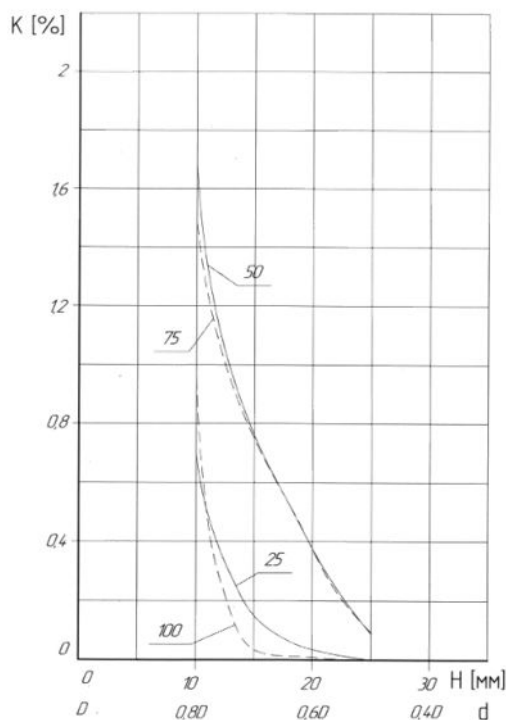


Рис. 4. Зависимость K , его максимального значения от H при различных частотах питающего тока

Анализируя данные по коэффициенту мощности, не удалось выявить чёткой зависимости между $\cos \varphi$ и размерами роторов. Выявлена зависимость от частоты питающего тока и определен порядок его значения 0,5–0,75, что является достаточно большой величиной.

Порядок проведения исследования с ферромагнитными элементами такой же, как и в предыдущих экспериментах. Отличие заключается во введении в активную зону K (рис. 2) различного количества ферромагнитных элементов (рис. 5.) Ферромагнитные элементы выполнены в виде стальных цилиндров с диаметром 1,5 мм и длиной 12 мм.

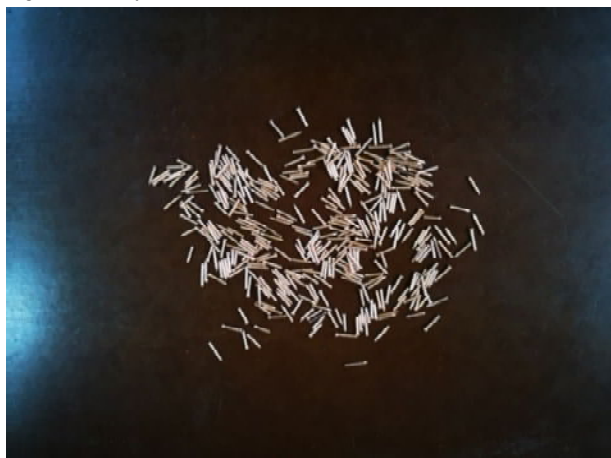


Рис. 5. Ферромагнитные элементы

В виду малости зазоров H (рис. 2.), ротор 1 и ротор 2 (рис. 5.) из экспериментов этого раздела

были исключены, так как зазор H соизмерим с длиной ферромагнитного элемента, что может повлиять на результаты экспериментов. Работа с ферромагнитными элементами проводилась на роторе 3 рис.3.

Анализируя результаты экспериментов, было замечено, что при работе с 50 и 100 граммами ферромагнитных элементов наблюдается увеличение коэффициента использования энергии ротором. Для более четкого выявления этой зависимости построен график K от M (рис. 6.).

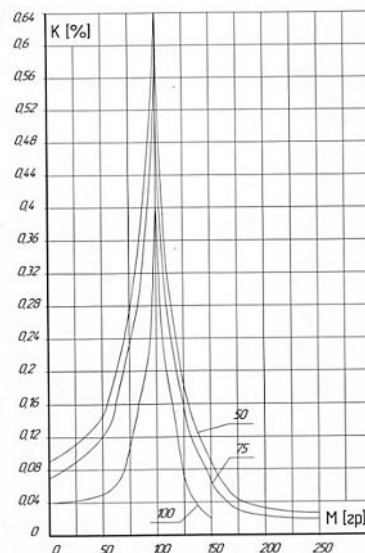


Рис. 6. Зависимость K , его максимального значения от M при различных частотах питающего тока

Из рис. 6 видно, что на 100 граммах ферромагнитных элементов наблюдается значительное возрастание K коэффициента использования энергии ротором. Это объясняется тем, что введенные ферромагнитные элементы сгущают магнитное поле, и оно с меньшими потерями доходит до поверхности ротора. Затем после 150 граммов наблюдается значительное уменьшение коэффициента использования энергии ротором K , это связано с тем, что набирается масса ферромагнитных элементов, которая начинает экранировать ротор от магнитного поля.

Этот эффект, может быть использован для совершенствования процессов, происходящих в аппаратах вихревого слоя. Так же на его основе можно создать прибор для контроля заполнения ферромагнитными элементами активной зоны аппарата вихревого слоя. Вводя измерительный ротор в середину можно контролировать степень поглощения ферромагнитными элементами генерируемого индуктором магнитного поля.

Несмотря на увеличение K его значение составляет порядка 0,5–1 %, что недопустимо мало и показывает несовершенство преобразования электрической энергии в механическую аппара-

тами вихревого слоя. Это затрудняет использование этих аппаратов для механического воздействия на обрабатываемый материал. Этот вывод можно распространить на все аппараты вихревого слоя классической конструкции, так как 400 грамм ферроэлементов являются, по сути, являются бесформенным ротором.

Анализируя данные по коэффициенту мощности, не удалось выявить чёткой зависимости между $\cos \varphi$ и количеством иголок. Установлена зависимость от частоты питающего тока, и определен порядок его значения 0,5–0,75, что является достаточно большой величиной.

Выводы. В статье описано исследование моторных режимов работы аппарата вихревого слоя, по результатам которого можно заключить.

Исследованы моментные характеристики роторов с различными размерами как отдельно, так и с отмеренными массами навесок ферромагнитных элементов. Это позволило выявить зависимости скольжения S и коэффициента использования энергии ротором K от мощности развиваемой ротором, по которым определилось влияние зазора H , между индуктором и стенкой ротора, на коэффициент K .

Проведенные замеры позволили выявить зависимость скольжения S и коэффициента использования энергии ротором K от мощности N развиваемой ротором, для различного количества ферромагнитных элементов. Это выявило особенность, которая отражена на рис. 6. При введении ферромагнитных элементов на первом этапе осуществляется резкое повышение коэффициента использования энергии ротором, с последующим его резким падением. Этот эффект может полезно использоваться для улучшения работы АВС как в моторном, так и в генераторном режиме.

Определён прядок коэффициента использования энергии ротором K , что выявило его явную недостаточность. Выяснилось, что $\cos \varphi$ зависит от частоты питающего тока и для данной установки имеет достаточно высокое значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах вихревого слоя. Киев: Изд. «Техника», 1976. 144 с.
2. Нгуен В.М., Конюхов Ю.В., Рыжонков Д.И. Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. №2. С. 96–101.
3. Селиверстов Г.В., Титов Д.П. Необходимость утилизации золошлаковых отходов с использованием перерабатывающих машин на принципах аппаратов вихревого слоя // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы междунар. научно-технической конф. Под общ. Редакцией Ш.М. Мерданова. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 276–278.
4. Селиверстов Г.В., Титов Д.П. Использование машин на принципах аппаратов вихревого слоя для утилизации золошлаковых отходов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы междунар. научно-технической конф. Под общ. Редакцией Ш.М. Мерданова. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 279–282.
5. Войтович В.А., Шварев Р.Р., Захарычев Е.А., Феокристов Е.П., Деревнев Р.Я., Захарычева Н.С. Эффективность применения аппаратов вихревого слоя в процессах измельчения порошковых материалов // Новые огнеупоры. 2017. №10. С. 48–53.
6. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Дебердеев Т.Р., Лексин В.В. Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя // Строительные материалы. 2017. №10. С. 28–31.
7. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Дебердеев Т.Р., Лексин В.В. Оптимальные параметры и картина магнитного поля рабочей камеры в аппаратах с вихревым слоем // Строительные материалы. 2018. №7. С. 64–67.
8. Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В., Дебердеев Т.Р. Влияние пластификаторов на свойства гипсовых вяжущих, активированных в аппаратах вихревого слоя // Вестник МГСУ. 2019. Т14. Вып. (126). С. 293–300.
9. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete. Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54 DOI: 10.5862 mce. 54.7
10. Mischenko M.V., Bokov M.M., Grishaev M.E. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field // Technical Sciences. 2015. № 2. Pp. 3508–3512.
11. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksins V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses // ZKG International. 2018. № 5. Pp. 28–35.
12. Данилина Э.М., Володин Г.И., Бреславец В.П. Потери энергии на вихревые токи в электромагнитных аппаратах вихревого слоя и способы их снижения // Известия вузов. Электромеханика. 2015. №1. С. 43–47.

13. Данилина Э.М., Астахов В.И. Вихревые токи и потери на них в пластине с разрезами // Известия вузов. Электромеханика. 2015. №4. С. 5–12.

14. Кицис С.И. Режимы установившегося самовозбуждения асинхронного генератора // Электричество. 2004. №2. С. 64–66.

15. Исследование параметров и характеристик машин с разомкнутым магнитопроводом. Под ред. Резина М.Г. Свердловск: УПИ, 1977. 137 с.

16. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 185 с.

Информация об авторах

Титов Дмитрий Петрович, аспирант кафедры ПТМиО. E-mail: titovd1981@yandex.ru. Тульский государственный университет. Россия 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Поступила в февраль 2020 г.

© Титов Д.П., 2020

Titov D.P.

Tula State University

E-mail: titovd1981@yandex.ru

ROTOR OPERATION IN THE VORTEX LAYER DEVICE

Abstract. Vortex layer devices can be means of intensification of most processes. It is particularly effective to use these devices to produce rubber products, to accelerate chemical processes, to prepare raw materials in metallurgy, to use them in ore processing processes, to solve environmental problems in wastewater treatment and in many other areas. Such widespread use is possible due to the properties of the vortex layer, which, in addition to mechanical impact, also provides electrochemical effects. The efficiency of traditional devices of this class can be improved by using a new design. This design is characterized by the presence of a rotor in the working area, which actively affects electromagnetic processes. This article is devoted to the study of the rotor operation in the vortex layer device. The research is of a practical nature and consists in studying the operation of an experimental installation. The design of this installation makes it possible to identify patterns in the designated area of research. This is achieved by using easily removable rotors of different diameters, which allow getting a gap between the rotor and the inductor of different sizes. Also, the design of the experimental installation allows to enter a different number of ferromagnetic elements into the active zone. The main evaluation criterion for the study is the coefficient of energy use by the rotor. Estimating the absolute value of this coefficient, a conclusion is drawn about the futility of classical devices for mechanical impact on the product. The results of the study are to determine the dependence of the operating parameters on the gap between the rotor and the inductor, as well as the number of ferromagnetic elements in the device under study.

Keywords: device of a vortex layer (DVL), pilot plant, research, motor mode, electrical characteristics, reactive power, the studied parameters.

REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Shelyakov O.P. Intensification of technological processes in apparatus of the vortex layer [Intensifikaciya tekhnologicheskikh processov v apparatah vikhrevogo sloya]. Kiev: Tekhnika, 1976. 144 p. (rus)

2. Nguyen V.M., Konyukhov Yu.V., Ryzhonkov D. I. Investigation of the influence of the electromagnetic field and energy-mechanical processing on the process of obtaining nanoscale powders of metallic cobalt by hydrogen reduction [Issledovanie vliyaniya elektromagnitnogo polya i energomekhanicheskoy obrabotki na process polucheniya nanorazmernykh poroshkov metallichesko koba'ta vosstanovleniem vodorodom]. Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy. 2018. No. 2. Pp. 96–101. (rus)

3. Seliverstov G.V., Titov D.P. The Need for utilization of ash and slag wastes using processing

machines based on the principles of vortex layer devices [Neobhodimost' utilizacii zoloshlakovykh othodov s ispol'zovaniem pererabatyvayushchih mashin na principah apparatov vikhrevogo sloya]. Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva: Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konf. Pod obshch. Redakciej Sh.M. Merdanova. Tyumen': Izd-vo TIU 2017. Pp. 276–278. (rus)

4. Seliverstov G.V., Titov D.P. Using machines based on the principles of vortex layer apparatuses for utilization of ash and slag wastes [Ispol'zovanie mashin na principah apparatov vikhrevogo sloya dlya utilizacii zoloshlakovykh othodov]. Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva: Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konf. Pod obshch. Redakciej Sh.M. Merdanova. Tyumen': Izd-vo TIU 2017. Pp. 279–282. (rus)

5. Voitovich V.A., Shvarev R. R., Zakharychev E.A., Feokristova E.P., Derebnev R.Ya., Zakharycheva N. S. Efficiency of using vortex layer devices in the processes of grinding powder materials [Effektivnost' primeneniya apparatov vikhrevogo sloya v processah izmel'cheniya poroshkovykh materialov]. New refractories. 2017. No. 10. Pp. 48–53. (rus)
6. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Strength of heavy concrete on Portland cement processed in a vortex layer apparatus [Prochnost' tyazhelogo betona na portlandcemente, obrabotannom v apparate vikhrevogo sloya]. Building materials. 2017. No. 10. Pp. 28–31. (rus)
7. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Optimal parameters and picture of the magnetic field of the working chamber in devices with a vortex layer [Optimal'nye parametry i kartina magnitnogo polya rabochej kamery v apparatah s vikhrevym sloem]. Building materials. 2018. No. 7. Pp. 64–67. (rus)
8. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T. R. Influence of plasticizers on the properties of gypsum binders activated in vortex layer devices [Vliyanie plastifikatorov na svoystva gipsovykh vyazhushchih, aktivirovannykh v apparatah vikhrevogo sloya]. Vestnik MGSU, 2019. Vol. 14. № (126). Pp. 293–300. (rus)
9. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanical activation of binder on properties of fine-grained concrete [Vliyanie mekhanicheskoy aktivatsii vyazhushchego na svoystva melkozernistogo betona]. Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54 DOI: 10.5862 mce. 54.7 (rus)
10. Mischenko M.V., Bokov M.M., Grishaev M.E. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field [Aktivizatsiya tekhnologicheskikh processov obrabotki materialov v ustrojstve vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem]. Technical Sciences. 2015. No. 2. Pp. 3508–3512. (rus)
11. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses [Strukturnye parametry i svoystva melkozernistogo betona na portlandcemente, aktivirovannogo zernistym betonom na portlandcemente, aktivirovannogo plastifikatorami v apparatah vikhrevogo sloya]. ZKG International. 2018. No. 5. Pp. 28–35. (rus)
12. Danilina E.M., Volodin G.I., Breslavets V.P. Energy losses on eddy currents in electromagnetic devices of the vortex layer and ways to reduce them [Poteri energii na vikhrevye toki v elektromagnitnykh apparatah vikhrevogo sloya i sposoby ih snizheniya]. Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2015. No. 1. Pp. 43–47. (rus)
13. Danilina E.M., Astakhov V.I. The eddy currents and the losses energy in the plate with the slits [Vikhrevye toki i poteri na nih v plastine s razrezami]. Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2015. No. 4. Pp. 5–12. (rus)
14. Kitsis S.I. Modes of steady-state self-excitation of an asynchronous generator [Rezhimy ustanovivshegosya samovozbuzhdeniya asinhronnogo generatora]. Electricity. 2004. No. 2. Pp. 64–66. (rus)
15. Investigation of parameters and characteristics of machines with an open magnetic circuit [Issledovanie parametrov i harakteristik mashin s razomknutym magnitoprovodom]. Edited by Rezina M. G. Sverdlovsk: UPI, 1977. 137 p. (rus)
16. Ivobotenko B.A. Design of experiments in electrical engineering [Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike]. Moscow: Energiya, 1975. 185 c. (rus)

Information about the authors

Titov, Dmitry P. Postgraduate. E-mail: titovd1981@yandex.ru. Tula State University, Russia, 300012, Tula, Lenin Avenue, 92.

Received in February 2020

Для цитирования:

Титов Д.П. Работа ротора в аппарате вихревого слоя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 114–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120

For citation:

Titov D.P. Rotor operation in the vortex layer device. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 114–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127

¹Качаев А.Е., ²*Орехова Т.Н., ²Окушко В.В., ²Шестаков Ю.Г.¹ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель»,²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nefact@mail.ru

МЕХАНИКА ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ С ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация. Качество перемешивания сухих строительных смесей во многом зависит от специализированной техники, которая используется при данном процессе. Для наилучшего смешения сухих строительных смесей используются пневмосмесители непрерывного действия. Пневмосмесители непрерывного действия являются наиболее эффективным оборудованием для получения сухих строительных смесей с более высокой степенью однородности. Именно этот показатель позволяет получить более качественный конечный продукт. В настоящее время существует большое количество пневмосмесителей непрерывного действия, которые активно модернизируются как в нашей стране, так и за рубежом. В статье представлена методика, которая описывает механику взвешенного слоя с полидисперсными частицами в рабочем объеме палитры смешения пневмосмесителя непрерывного действия. Данная методика получена на основании исследований, которые проводились авторами статьи с учетом экспериментальных данных, которые были получены другими учеными. В данном материале обобщен подход к численному моделированию взвешенного слоя с частицами различной дисперсности (на примере для сухих строительных смесей) и плотности. Так же были установлены зависимости границы слоя, его порозности, и скоростных параметров от диаметров частиц, геометрических параметров камеры смешения и иных технологических величин, которые влияют на взвешенный слой внутри камеры. В тексте статьи представлен алгоритм расчета механики взвешенного слоя, который зарекомендовал себя при численном моделировании слоя высокими показателями точности расчетов, что в дальнейшем подтвердилось необходимым количеством экспериментальных данных.

Ключевые слова: камера смешения, поток, частица, параметр торможения, циркуляция, тангенциальная скорость, порозность слоя.

Введение. Вопросы эффективного перемешивания компонентов различной дисперсности ставятся в различных отраслях промышленности. Решение этих вопросов всегда неоднозначно и нетривиально. Это связано с тем, что в условиях действующих предприятий по выпуску сухих строительных смесей, порошковых красок, пигментов, извести и др. в промышленности строительных материалов широко используются различного типа смесители: лопастные, роторные, планетарные, гравитационные и другие. Однако наряду с высокой надежностью этих агрегатов они имеют и ряд недостатков: высокая металлоемкость, высокие показатели износа рабочих органов, сравнительно невысокие показатели однородности готового продукта.

Коллективом авторов разработаны конструкции пневмосмесителей непрерывного действия [1, 2, 3], которые отвечают современным требованиям, предъявляемым к технологическому оборудованию для гомогенизации полидисперсных компонентов: низкая металлоемкость конструкции (за счет изготовления корпуса смесительного агрегата из мягкого полиуретана); отсутствие в готовом продукте металлических включений; высокая производительность и коэффициент однородности смеси.

За последние годы как у нас в стране [4, 5] так и за рубежом [6, 7] эффективно используются агрегаты с пневматическим принципом перемешивания порошкообразных масс: вертикального исполнения, горизонтального типа, с псевдооживлением слоя компонентов смеси и др. В этом особое место занимают пневмосмесители горизонтального типа непрерывного действия с камерой смешения переменного поперечного сечения. Для использования пневмосмесителей при производстве сухих строительных смесей различной дисперсности, в конструкции которых присутствует камера в виде параболического корпуса, очень важно уделить внимание динамике полидисперсного потока [8]. В виду сложности всех динамических моделей на различных этапах движения компонентов в пневмосмесителе необходимо поддерживать полидисперсный поток во взвешенном состоянии. Именно поэтому очень важно определить характер поведения частиц различного диаметра в рабочем объеме пневмосмесителя. Для этого необходимо описать механику взвешенного слоя в камере смешения с целью управления эффективными режимами эксплуатации пневмосмесителя [9].

Основная часть. Условия механики взвешенного слоя сформулируем так: если критический диаметр частицы $d_{кр}$ больше максимального d_{max} для имеющихся в слое частиц, то все частицы будут взвешены [10]. В этом случае аргумент функции распределения частиц $\tau_{кр} \gg 1$ и $D(\tau_{кр}) \approx 1$ поэтому из (13) параметр $S = 1$, т.е. полностью взвешенный слой не будет тормозить поток о криволинейную поверхность камеры. С уменьшением такого торможения возрастает значение торможения потока с частицами о торцевые днища камеры. Этот вид торможения играет более существенную роль для мелких частиц, взвешенных в газообразном объеме, в камере с параболическими коническими стенками [11]. В соответствии с [12] для полностью взвешенного слоя будем учитывать торможение потока о торцевые поверхности. Рассматривается однородный взвешенный слой цилиндрической формы длиной L , наружным радиусом R_n и внутренним R_i [13]. Если M - масса частиц в слое, то доля объема, занятая средой, т.е. порозность слоя ε , будет:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_{p\Sigma}}{V} = 1 - \frac{M}{\pi(R_n^2 - R_i^2)L\rho_p}, \quad (1)$$

где V – объем слоя; V_c – объем занимаемый средой; $V_{p\Sigma}$ – объем всех частиц. Тогда среднюю плотность слоя можно записать так:

$$\rho_c = \frac{\rho V_c + \rho_p V_p}{V} = \rho_p(1 - \varepsilon) + \rho\varepsilon \quad (2)$$

Рассмотрим взаимодействие кольцевого взвешенного слоя радиусом r и шириной δr с торцевыми стенками камеры смешения. Сила воздействия двухфазного потока на единицу площади торцевой поверхности определяется скоростным напором $C_f \rho_c v_c^2$, где C_f – коэффициент трения потока о стенку [14]. Тогда момент сил взаимодействия кольцевого слоя на две торцевые стенки камеры равен:

$$d\Omega = 2C_f \frac{\rho_c v_c^2}{2} 2\pi r \cdot r dr = 2\pi C_f \rho_c \Gamma^2 dr, \quad (3)$$

где $\Gamma = v_c r$ – циркуляция потока, проходящего через слой; v_c – тангенциальная скорость среды и частиц слоя [15].

Этот момент сил приводит к уменьшению потока момента количества движения среды $\Omega = G \cdot \Gamma$, проходящей через слой dr :

$$d\Omega = G \cdot d\Gamma \quad (4)$$

Исключая $d\Omega$ из (3) и (4), получаем уравнение

$$G d\Gamma = 2\pi C_f \Gamma^2 \rho_c dr,$$

после интегрирования которого при граничном условии $\Gamma(R_n) = \Gamma_{ск}$ на наружном радиусе R_n слоя имеем [16]:

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{ск}}{1 + 2\pi C_f \rho_c (R_n - r) \Gamma_{ск} / G}. \quad (5)$$

Так как наружный радиус слоя R_n может быть меньше $R_{кр}$, то в области $R_{кр} \leq r \leq R_n$ циркуляция будет постоянна [17]. Поэтому можно записать

$$\Gamma_{ск} = v_{ск} \cdot R_n, \quad (6)$$

Отсюда

$$\Gamma_{ск} = \frac{\sqrt{4\pi C_f \rho_c \Gamma_{ск} L / G + 1} - 1}{2\pi C_f \rho_c L / G} \quad (7)$$

где $\Gamma_{ск} = v_{ск} \cdot R_{кр}$; $v_{ск}$ – тангенциальная скорость на периферии ненагруженной камеры смешения.

Выведенные соотношения зависят от коэффициента трения C_f . В [11] результате сопоставления расчетов с экспериментом получено $C_f = 0,003$, а [8] для псевдооживленного слоя по аналогии с дисперсно-кольцевым потоком в трубах предлагается $C_f = 0,005$. Такого порядка значения для коэффициента сопротивления следуют из формулы Прандтля [8]

$$C_f = \frac{0,077}{Re^{0,2}} \quad (8)$$

при $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$, которая обобщает эксперименты по сопротивлению гладкой пластины. Для камеры смешения $Re = v_{ск} R_{кр} / \nu$.

Методика исследований. Последовательность действий для расчёта взвешенного слоя в камере смешения пневмосмесителя:

1. Исходными данными является геометрия камеры смешения, массовый расход полидисперсной воздушной среды, её свойства, свойства частиц и масса слоя M .

2. Определяется максимальный и минимальный диаметр частиц. При известном нормально-логарифмическом распределении эти диаметры рассчитываются с 5%-ной обеспеченностью. Тогда согласно [18]:

$$\tau = \frac{\lg(d, d_{50})}{\lg \sigma} \quad (9)$$

где τ – аргумент функции распределения; σ – дисперсия; d – диаметр частицы; d_{50} – медианный диаметр частицы; и с учётом того, что $D(1.65) = 1 - D(-1.65) = 0.95$, получаем

$$d_{max} = d_{50} \cdot \sigma^{1.65} \quad (10)$$

$$d_{min} = d_{50} \cdot \sigma^{-1.65} \quad (11)$$

3. По экспериментальной зависимости в [19]

$$\frac{1}{s} \approx \overline{M}(1 - \overline{p}) \left(1 - D(\tau_{кр}) \right) f_f + 1 \quad (12)$$

где s – параметр торможения потока зондом или слоем частиц; $\overline{M}$ – средняя масса слоя в смеси-

тельной камере; P – порозность слоя; D – функция распределения от $\tau_{кр}(\tau)$; f_f – коэффициент трения частиц о поверхность камеры;

определяем параметр торможения S . Если $S \approx 1$, это свидетельствует, что частицы не соприкасаются с поверхностью камеры.

Таблица 1

Входные данные

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Массовый расход газа	G	.24000E-01(кг/с)
Радиус камеры	R_k	.80000E-01(м)
Радиус выходного отверстия	R_i	.27500E-01(м)
Длина камеры	L	.20000E+00(м)
Площадь щелей завихрителя	F_{vx}	.36000E-03(м**2/с)
Угол наклона	P_{sivx}	.60000E+02(град)
Вид завихрителя	VID	1
Кинематическая вязкость	ν	.15000E-04(м**2/с)
Плотность среды	ρ_c	.12600E+01(кг/м**3)
Плотность частиц	ρ_p	.23200E+04(кг/м**3)
Медианный диаметр частиц	d_{50}	.10000E-04(м)
Мин. диаметр частиц	d_{min}	.96272E-05(м)
Макс. диаметр частиц	d_{max}	.10387E-04(м)
Логарифм дисперсии распр.	σ	.10000E-01
Коеф. Отставания частицы	β	.10000E+01
Масса слоя	M	.14600E+00(кг)
Структура слоя для частиц с d_{min} (1-одна ветвь, 2-две ветви)	$KOD3$	1
Относительная точность	EPS	.10000E-01

Таблица 2

Результаты расчетов

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Скорость у стенки камеры	v_{ck}	.67976E+01(м/с)
Средняя порозность слоя	ε	.97354E+00
Возможные параметры слоя при $A=.45926E+01$		
Диаметр частицы на R_1	d_{R1}	.95721E-05(м)
Тангенциальная скорость	v_1	.49266E+01(м/с)
Минимальная танг. скорость	v_{min}	.39925E+01(м/с)
Радиус v_{min}	R_{min}	.48710E-01(м)
Диаметр частицы на R_{min}	d_{Rmin}	.11812E-04(м)
Диаметр частицы на R_k	d_{Rk}	.69374E-05(м)
Параметры на внутреннем радиусе слоя		
Диаметр частицы	d_{cmin}	.96272E-05(м)
Внутренний радиус слоя	R_1	.27762E-01(м)
Тангенциальная скорость	v_{cR1}	.48984E+01(м/с)
Параметры для средней частицы D50		
Диаметр D50	d_{50}	.10000E-04(м)
На внутренней ветви		
Радиус траектории	R_{50}	.29633E-01(м)
Тангенциальная скорость	v_{50}	.47158E+01(м/с)
На наружной ветви		
Радиус траектории	R_{50}	.67786E-01(м)
Тангенциальная скорость	v_{50}	.47158E+01(м/с)
Параметры на внутреннем радиусе слоя		
Диаметр	d_{cRn}	.10387E-04(м)
Наружный радиус слоя	R_n	.65626E-01(м)
Тангенциальная скорость	v_{cRn}	.45401E+01(м/с)

4. Задаются границы слоя $R_n = R_1$ и $R_i = R_1$ (где R_n – начальный радиус камеры, R_1 – радиус выходного отверстия)

5. По (1) и (2) рассчитывается плотность слоя ρ_c

6. По (10) определяется коэффициент трения потока о поверхность C_f .

7. Необходимая тангенциальная скорость частиц в слое на определённом радиусе R_i находится из условия $K_s = R_i$ (где K_s – коэффициент сепарации), из которого из стоксовских частиц получаем:

$$v_c = \sqrt{\frac{9vQ\bar{\rho}}{\pi L(1-\bar{\rho})d^2}} \quad (13)$$

здесь v – климатическая вязкость; L – длина камеры; D – диаметр частицы [20].

Как видно, скорость зависит от диаметра частицы и явно не зависит от радиуса R_i

8. Согласно (9) определяется циркуляция $\Gamma_{ск}$ на периферии слоя

9. Из (5) определяется радиус $\bar{R}_i = \frac{R_i}{R_k}$ на котором частицы имеют скорость v_c :

$$\bar{R}_i = \frac{(1+A\bar{R}_n) \pm \sqrt{(1+A\bar{R}_n)^2 - 4\frac{A}{v_c}}}{2A} \quad (14)$$

где

$$A = \frac{2\pi C_f \rho_c R_n \tau_{ск}}{G} \quad (15)$$

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_{ск}} \quad (16)$$

Здесь $v_{ск}$ – тангенциальная скорость слоя на поверхности камеры; v_c – среднее значение тангенциальной скорости частиц в камере; A – геометрический коэффициент потока со взвешенными частицами; $\tau_{ск}$ – циркуляция слоя в камере. $\bar{R}_n$ – среднее значение начального радиуса камеры.

10. Для d_{min} и d_{max} по (13) и (14) определяются радиусы орбит этих частиц r_{min} и r_{max}

11. Задаются новые границы слоя $R_n = r_{max}$ и $R_k = r_{min}$, и расчёт повторяется с п.4. Расчёты проводятся до совпадения результатов с необходимой точностью. В итоге данная методика расчёта взвешенного слоя в камере пневмосмесителей позволяет определить границы слоя, его порозность и скоростные параметры его вращения. По данной методике получены расчётные данные о механике взвешенного слоя, которые представлены в таблице 2. Исходные данные для расчёта показаны в таблице 1.

Выводы. В данной статье была разработана методика расчета механики взвешенного слоя, преимуществом которой являются более точные

показатели расчетов, что подтверждается экспериментальными данными. Так же были получены зависимости скоростных параметров частиц от параметров камеры смешения и размеров самих частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 102533, Российская федерация, МПК В01 F5/00. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.И. Гордиенко, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. № 20101140830; заявл. 05.10.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7.

2. Пат. 141488, Российская Федерация, МПК В01 F5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.В. Ключев, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. №2013159013; заявл. 30.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16.

3. Пат. 115682, Российская Федерация, МПК В01 F5/00. Пневмосмеситель многокомпонентных сухих строительных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.И. Гордеев, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. №2011151913; заявл. 19.12.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. №13.

4. Корнеев В.И. Сухие строительные смеси (состав, свойства). М.: РИФ «Стройматериалы», 2010. 320 с.

5. Банит Ф.Г. Эксплуатация, ремонт и монтаж оборудования промышленности строительных материалов. М.: Стройиздат, 1991. 368 с.

6. Arratia P.E., Muzzio F.J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations // Powder Technology. 2006. No. 164. Pp. 50–57.

7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004. No. 6. Pp. 1143–1168.

8. Воляков Э.П., Кардаш А.П. Гидродинамика вихревой гиперболической камеры при наличии твёрдой фазы // Изв. СО РАН СССР. Сер. техн. наук. 1984. № 10. С. 90–98.

9. Anderson L.A., Hasinger, S.H., Turman, B.N. Two-component vortex flow studies of the colloid core nuclear rocket // J. Spacecraft and rock. 1972. No. 5. Pp. 311–317.

10. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. М.: Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1992. 301 с.

11. Uvarov V.A. The counterflow mixer for receiving the disperse reinforced composines // Research Journal of Applied Sciences. 2014. No. 12. Pp. 1211–1215.

12. Романович А.А., Орехова Т.Н., Мещеряков С.А., Прокопенко В.С. Технология получения минеральных добавок // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 5. С. 188–192.

13. Орехова Т.Н., Уваров В.А. Определение скорости частиц материала пневмосмесителя сухих строительных смесей // Фундаментальные исследования. 2013. № 4. С. 592–596.

14. Уваров В.А., Орехова Т.Н. Анализ конструкций пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Интерстроймех. 2010. № 7. С. 91–96.

15. Орехова Т.Н., Агарков А.М., Голубятников А.А. Направления конструктивно-технологического совершенствования пневмосмесителей для производства строительных материалов // Научный альманах. 2015. №3. С. 124–127.

16. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Pneumatic Mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures // News of Science and Education. 2018. No. 4. Pp. 24–27.

17. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Pneumatic vertical mixer // News of Science and Education. 2018. No. 4. Pp. 21–23.

18. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Trends in the development of modern technology and technologies for mixing bulk materials // News of Science and Education. 2018. No. 4. Pp. 17–20.

19. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Classification of mixing equipment for the construction industry // News of Science and Education. 2018. No. 4. Pp. 13–16.

20. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Improvement of devices for mixing dry building mixes // News of Science and Education. 2018. No. 4. Pp. 9–12.

Информация об авторах

Качаев Александр Евгеньевич, начальник конструкторско-технологического управления, главный конструктор ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель». E-mail: nefact@mail.ru. Россия, 140203, Московская обл. г. Воскресенск, ул. Гаражная, 1.

Орехова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Окушко Виктория Вадимовна, магистрант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: viktoriaoakushko@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шестаков Юрий Геннадьевич, студент группы НС-31 кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2020 г.

© Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г., 2020

¹Kachaev A.E., ²*Orekhova T.N., ²Okushko V.V., ²Shestakov Y.G.

¹Voskresensky Plant Mashinostroitel LLC

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

*E-mail: nefact@mail.ru

MECHANICS OF THE SUSPENDED LAYER WITH POLYDISPERSE PARTICLES IN CONTINUOUS AIR MIXERS

Abstract. The quality of mixing of dry building mixes largely depends on the specialized equipment that is used in this process. For the best mixing of dry building mixes, continuous pneumatic mixers are used. Continuous air mixers are the most effective equipment for producing dry building mixes with a higher degree of uniformity. This indicator allows to achieve a better final product. Currently, there are a large number of continuous air mixers that are actively being modernized both in our country and abroad. The article presents a technique that describes the mechanics of a suspended layer with polydisperse particles in the working volume of the displacement palette of a continuous air mixer. The method is based on research conducted by the authors of the article, taking into account experimental data obtained by other scientists. This paper summa-

rizes an approach to numerical modeling of a suspended layer with particles of different dispersion (for example, for dry building mixes) and density. The dependences of the layer boundary, its porosity, and speed parameters on the particle diameters, geometric parameters of the mixing chamber, and other technological values that affect the suspended layer inside the chamber are established. The article presents an algorithm for calculating the mechanics of the weighted layer, which proved itself in numerical modeling of the layer with high accuracy of calculations, which is later confirmed by the necessary amount of experimental data.

Keywords: *mixing chamber, flow, particle, braking parameter, circulation, tangential velocity, layer porosity.*

REFERENCES

1. Uvarov V.A., Orekhova T.N., Gordienko S.I., Kachaev A.E. Continuous pneumatic mixer for the production of dry building mixes. Patent RF, no. 20101140830, 2010.
2. Uvarov V.A., Orekhova T.N., Klyuyev S.V., Kachaev A.E. Countercurrent pneumatic mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures. Patent RF, no. 2013159013, 2013.
3. Uvarov V.A., Orekhova T.N., Gordeev S.I., Kachaev A.E. Pneumatic mixer of multi-component dry building mixes. Patent RF, no. 2011151913, 2012.
4. Korneev V.I. Dry building mixes (composition, properties). [Sukhie stroitelnye smesi: sostav, svoystva]. Moscow: RIF "Building Materials", 2010. 320 p. (rus)
5. Banit F.G. Operation, repair and installation of equipment for the construction materials industry. [Ekspluatatsiya, remont i montazh oborudovaniya promyshlennosti stroitelnykh materialov]. Moscow: Stroizdat, 1991. 368 p. (rus)
6. Arratia P.E., Duong Nhat-hang, Muzzio F.J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations. Powder Technology. 2006. Vol. 164. Pp. 50–57.
7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004. Vol. 85. No. 6. Pp. 1143–1168.
8. Polyakov E.P., Kardash A.P. Hydrodynamics of a vortex hyperbolic chamber in the presence of a solid phase [Gidrodinamika vikhrevoj giperbolicheskoy kamery pri nalichii tvyordoy fazy]. Izv.SO RAN SSSR. Ser.tekhn. nauk. 1984. Vol. 2. No. 10. Pp. 90–98. (rus)
9. Anderson L.A., Hasinger S.H., Turman B.N. Two-component vortex flow studies of the colloid core nuclear rocket. J. Spacecraft and rock. 1972. Vol. 9. No. 5. Pp. 311–317.
10. Smulsky J.J. The Aerodynamics and processes in vortex chambers. [Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh]. Novosibirsk: VO "Nauka". Siberian publishing company, 1992. 301 p. (rus)
11. Uvarov V.A. The counterflow mixer for receiving the disperse reinforced composites. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 12. Pp. 1211–1215.
12. Romanovich A.A., Orekhova T.N., Meshcheryakov S.A., Prokopenko V.S. Technology of producing mineral admixtures. [Tehnologia polychenia mineralnih dobavok]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 5. Pp. 188–192. (rus)
13. Orekhova T.N., Uvarov V.A. Determination of the particle velocity of the material of the pneumatic mixer of dry building mixes [Opredelenie skorosti chastits materiala pnevmosmesiteley sykhikh stroitelnykh smesey]. Fundamental research. 2013. No.4. Pp. 592–596. (rus)
14. Uvarov V.A., Orekhova T.N. The structural analysis of pneumatic mixer for the production of dry construction mixtures. [Analiz konstruktivnoy pnevmosmesiteley dlya proizvodstva sykhikh stroitelnykh smesey]. Interstroyemh. 2010. Pp. 91–96. (rus)
15. Orekhova T.N., Agarkov A.M., Golubyatnikov A.A. Directions of constructive and technological improvement of pneumatic mixers for the production of building materials. [Napravleniya konstruktivno-tekhnologicheskogo sovershenstvovaniya pnevmosmesiteley dlya proizvodstva stroitelnykh materialov]. Scientific almanah. 2015. No. 3. Pp. 124–127. (rus)
16. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Pneumatic Mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures. News of Science and Education. 2018. Vol. 1. No. 4. Pp. 24–27.
17. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Pneumatic vertical mixer. News of Science and Education. 2018. Vol. 1. No. 4. Pp. 21–23.
18. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Trends in the development of modern technology and technologies for mixing bulk materials. News of Science and Education. 2018. Vol. 1. No. 4. Pp. 17–20.
19. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Classification of mixing equipment for the construction industry. News of Science and Education. 2018. Vol. 1. No. 4. Pp. 13–16.

20. Orekhova T.N., Krasnov V.V., Demushkin N.P. Improvement of devices for mixing dry building mixes. News of Science and Education. 2018. Vol. 1. No. 4. Pp. 9–12.

Information about the authors

Kachaev, Aleksander E. Head of design and Technological Administration, Chief Designer of Voskresensky Plant Mashinostroitel LLC. E-mail: nefact@mail.ru. Russia, 140203, Moscow region Voskresensk, st. Garage, 1.

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

Okushko, Viktoriya V. Master student. E-mail: viktorიაokushko@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shestakov, Yuri G. Student of the NS-31 group of the Department of lifting and road vehicles. E-mail: nefact@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received in January 2020

Для цитирования:

Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127

For citation:

Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Y.G. Mechanics of the suspended layer with poly-disperse particles in continuous air mixers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127

Научное издание

«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»
№ 3, 2020 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала
Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала
Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка
Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык
Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации №ФС 77-26533 от 07.12.2006

Подписано в печать 31.03.20. Формат 60×84/8
Усл. печ. л. 14,76. Уч.-изд. л. 15,86
Тираж 40 экз. Заказ 54. Цена договорная.
Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк.
Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».
Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова