

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2022

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

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

№ 11, 2022 год

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

Vol. 11. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	14.11.2022
Выход в свет	23.11.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,76. Уч.-изд. л. 15,86. Тираж 40 экз. Заказ № 131

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/255810462/
Signed for printing:	14.11.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

Бурьянов Александр Федорович, д-р техн. наук, проф. НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва), исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации (РФ, г. Москва).

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., н.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

Aleksandr F. Buryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university). (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В.	
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ПЕНОБЕТОНА ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ	8
Винокурова О.В., Баранова А.А.	
К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОБЕТОНА	19
Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПНОПОРИСТОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОГО 3D-АДДИТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА	30
Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О.	
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ	40
Грахов В.П., Толкачев Ю.А.	
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПУНКТОВ ВРЕМЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ	49
Василенко Н.А., Коренькова Г.В., Земскова А.О.	
СТИЛЕВОЙ И ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ПРИМЕРЕ ХРАМА ПОЧАЕВСКОЙ ИКОНЫ БОЖИЕЙ МАТЕРИ В Г. БЕЛГОРОДЕ	64
Монастырская М.Е., Песляк О.А.	
СПЕЦИФИКА ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КРУПНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В СКАНДИНАВСКИХ СТРАНАХ. ЧАСТЬ III: СОПОДЧИНЕННОСТЬ «НОВОГО ЛОКАЛИЗМА» ДИРЕКТИВНОМУ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ В ДАНИИ	77

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Павленко В.И., Кашибадзе В.В., Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Домарев С.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДсорбЦИИ ЭТИЛГИДРОСИЛОКСАНА НА ПОВЕРХНОСТИ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА	90

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Башмур К.А., Петровский Э.А.	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЯЧЕИСТОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ	99
Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А.	
СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ADAMS-MATLAB	108
Сахнов А.В., Фоменко Ю.В.	
СПОСОБ РЕМОНТА ГАЙКИ ХОДОВОГО ВИНТА	120

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Kozhukhova N.I., Strokov V.V., Kolomytseva A.I., Manuilova A.I., Zhernovskaya I.V. FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF GEOPOLYMER FOAM CONCRETE WITH DIFFERENT METHODS OF PREPARING A CELLULAR RAW MIXTURE	8
Vinokurova O.V., Baranova A.A. ON THE QUESTION OF CHOOSING THE OPTIMAL WATER-CEMENT RATIO IN THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATING FOAM CONCRETE	19
Sheremet A.A., Elistratkin M.Yu., Sheremet E.O., Lesovik V.S., Shatalova S.V. INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF COARSE-PORED EXPANDED CLAY CONCRETE FOR THREE-LAYER 3D ADDITIVE CONSTRUCTION	30
Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. PRELIMINARY DESCRIPTION OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS DURING BENDING WITH TORSION	40
Grakhov V.P., Tolkachev Yu.A. PROSPECTS FOR THE USE OF MODULAR CONSTRUCTION IN THE ORGANIZATION OF TEMPORARY ACCOMMODATION	49
Vasilenko N.A., Korenkova G.V., Zemskova A.O. STYLISTIC AND PROPORTIONAL ARCHITECTURAL ANALYSIS OF THE RECONSTRUCTED OBJECT ON THE EXAMPLE OF THE CHAPEL POCHAEV ICON OF THE MOTHER OF GOD IN BELGOROD	64
Monastyrskaya M.Ye., Peslyak O.A. THE SPECIFICS OF URBAN PLANNING OF LARGE URBANIZED TERRITORIES IN THE SCANDINAVIAN COUNTRIES. PART III: SUBORDINATION OF “NEW LO- CALISM” TO DIRECTIVE URBAN PLANNING IN DENMARK	77

CHEMICAL TECHNOLOGY

Pavlenko V.I., Kashibadze V.V., Romanyuk D.S., Sidelnikov R.V., Domarev S.N. INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF ADSORPTION OF ETHYLHYDROSILOXANE ON THE SURFACE OF TUNGSTEN CARBIDE	90
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Bashmur K.A., Petrovsky E.A. TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF CELL RELIEF TO PROVIDE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CYLINDRICAL SURFACES OF TECHNOLOGICAL UNITS	99
Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A. CO-SIMULATION PARALLEL MANIPULATOR MOVEMENTS USING ADAMS-MATLAB	108
Sakhnov A.V., Fomenko Yu.V. METHOD OF REPAIR OF THE LEAD SCREW NUT	120

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18

Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru*

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ПЕНОБЕТОНА ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Аннотация. Известно, что качество бетонного композита во многом зависит не только от свойств исходного сырья, но также от ряда технологических факторов, которые, зачастую, являются определяющими. В особенности, это актуально при формировании композитов с ячеистой структурой.

В данной статье рассмотрено влияние различных способов приготовления ячеистой сырьевой смеси при получении геополимерного пенобетона на особенности формирования поровой структуры, а также его физико-механические свойства.

Для оценки качества формируемой ячеистой структуры использовался преимущественно визуальный анализ. Установлено, что для приготовления геополимерной ячеистой сырьевой смеси наиболее эффективными можно считать 2 способа, в которых предусмотрено 3-х стадийное смешение компонентов: приготовление водного щелочного раствора; приготовление пены; приготовление геополимерной суспензии с последующим добавлением в нее пены.

Выявлено, что при использовании способов, предусматривающих 3-х стадийное смешение компонентов, в образцах геополимерного пенобетона обеспечиваются наиболее низкие значения по таким физическим характеристикам как средняя плотность: $615\text{--}620 \text{ кг/м}^3$; и коэффициент теплопроводности: $0,109\text{--}0,112 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{С}$. При этом, наименее эффективными способами приготовления ячеистой сырьевой смеси для геополимерного пенобетона являются методы, основанные на одностадийном смешении компонентов. В этом случае в пенобетонных образцах наблюдается практически полностью нарушенная целостность структуры пор и, как следствие, неудовлетворительные показатели физико-механических свойств.

Ключевые слова: геополимерный пенобетон, способ приготовления ячеистой сырьевой смеси, поровая структура, физико-механические свойства.

Введение. Одним из важных аспектов получения строительных материалов с необходимыми эксплуатационными свойствами является соблюдение требований на протяжении всего технологического процесса: на стадиях подбора сырья, приготовления сырьевой смеси, формовки изделий и условий их твердения. Для известных вяжущих систем и материалов, имеющих широкое практическое применение, существуют отдельные технологические схемы, а также сформулированы и количественно определены требуемые параметры, предъявляемые к сырьевым компонентам, характеристикам вяжущей смеси или сырца, подбора условий их отвердевания и так далее.

В случае новых видов материалов, их эффективное производство затруднено отсутствием таковых общепринятых параметров. Геополимеры в полной мере можно отнести к классу новых, слабо изученных, но перспективных строительных материалов.

Технологические особенности синтеза геополимеров и материалов на их основе активно

рассматриваются учеными различных стран [1–5].

В результате большого объема исследований и полученных на их основе экспериментальных данных [6–12] на сегодняшний день сформулированы следующие основные критерии эффективности (качества) сырья и технологии его консолидации для получения геополимерных вяжущих и материалов (рис. 1):

- алюмосиликатный состав с соотношением основных оксидов $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в диапазоне 1,5–2,5;
- содержание оксидов щелочноземельных металлов (CaO , MgO) не более 10 %;
- концентрация рентгеноаморфной составляющей (как правило, стеклофазы) в составе алюмосиликата – не менее 50–60 %;
- низкое содержание оксидов железа (FeO);
- использование термической сушки для интенсификации процесса консолидации;
- применение солей и гидроксидов щелочных металлов в качестве активатора твердения алюмосиликатного компонента.



Рис. 1. Критерии эффективности сырья и технологии консолидации для получения геополимерных вяжущих и материалов на их основе

Исходя из литературных данных [13–15], геополимерные композиты, получаемые на основе сырья с высокой реакционной активностью, демонстрируют хорошие эксплуатационные (физико-механические) характеристики в широком диапазоне значений. В то же время, использование низкоактивного сырья чревато формированием у конечных композитов неудовлетворительных эксплуатационных характеристик, таких как прочность [16], водостойкость [17] и так далее.

В значительной мере степень реакционной активности алюмосиликатного сырья проявляет себя при получении ячеистых структур на основе геополимеров, поскольку, в данном случае, прочность матрицы оказывает решающий эффект на целостность порового каркаса, который априори более слабый, чем плотный аналог.

В настоящее время ячеистые геополимеры или геополимерные пены (то есть геополимерные системы с пористостью более 70 %) вызывают живой интерес со стороны ученых в области неорганических ячеистых материалов и находят свои потенциальные и реальные области применения в различных сферах [18] благодаря уникальному сочетанию физических, термических и механических свойств [19–21].

Для обеспечения ячеистой структуры в матрице геополимера в литературных источниках предлагается 4 способа производства: метод прямого пенообразования; метод реплик; метод абляционных наполнителей; технология послойного синтеза (3D-печать) (рис. 2) [22].

Среди вышеотмеченных технологий наиболее распространенной является технология прямого пенообразования. Данный метод, основан

на формировании ячеистой геополимерной суспензии, которая может быть получена двумя способами:

- 1) путем аэрирования геополимерной сырьевой смеси – принудительного введения воздуха в вяжущую систему;
- 2) путем использования порообразующих агентов в виде пено- и газообразователей.

С термодинамической точки зрения аэрирование представляет собой неустойчивый процесс. Это связано с тем, что газовые пузырьки в жидкой фазе пены склонны к произвольному водоистечению, продолжительному Освальдскому созреванию или коалесценции, которая позволяет минимизировать общую свободную энергию Гиббса водовоздушной суспензии. В результате этой неустойчивости формируется макропористость структуры, а также широкий разброс по размерам пор, что является важным фактором, который негативно отражается на эксплуатационных свойствах конечного ячеистого геополимерного композита.

В исследованиях Chengying Bai и других [23] применялся метод прямого вспенивания с использованием перекиси водорода (химического порообразователя) в сочетании со стабилизирующим агентом. В результате были получены ячеистые геополимеры на основе отходов стекла с общей пористостью около 55 %, теплопроводностью примерно $0,21 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ и прочностью на сжатие примерно $7,3 \text{ МПа}$. В качестве дополнительной стадии применялась термическая обработка образцов ячеистых геополимеров при $700\text{--}900^\circ\text{C}$. Данная процедура позволила обеспечить значительное увеличение объема пено-

массы (вторичное вспенивание). В результате такого подхода были получены образцы с высокой общей пористостью (77–88 %), низкой насыпной плотностью (0,27–0,48 г/см³), низким коэффициентом теплопроводности (0,11–0,15 Вт/м °С), а

также довольно высокие показатели прочности на сжатие (1,2–5,5 МПа). Однако, основным недостатком этого метода является необходимость использования высокотемпературной обработки (700–900 °С).

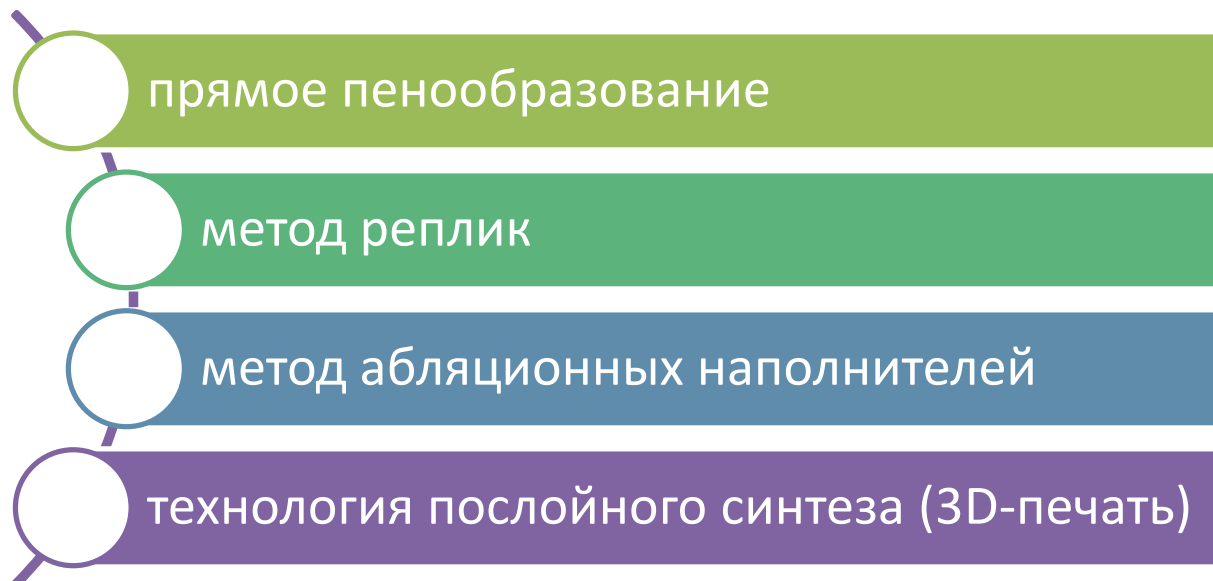


Рис. 2. Существующие способы обеспечения ячеистой структуры матрицы геополимерного композита

Авторами работы [24] предложен способ приготовления пенобетонной смеси, который заключается в перемешивании сухого материала, такого как порошок сталеплавильного шлака, измененный красный шлам, модифицированный метаксаолин, порошок молотого шлака; добавлении щелочного активатора и воды в смесь из твердых компонентов и их смешение до образования суспензии; параллельно с этим: приготовление пены путем смешения пенообразователя и воды в соотношении 1:15 с помощью гомогенизатора; добавление полученной пены в суспензию и их смешение в течение 2,5–3 мин до равномерного распределения пены в суспензии. Полученные в результате использования такого метода характеристики геополимерного пенобетона следующие: средняя плотность – 550 кг/м³; прочность на сжатие: – 2,8 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,107 Вт/(м·°С).

Однако, основными недостатками способа является тот факт, что для обеспечения заявленных эксплуатационных характеристик требуется длительное время отверждения – в течение 28 сут, что значительно увеличивает производственный процесс.

Авторами Cong M., Zhang Sh. И другими [25] описаны методы приготовления и характеристики легкого пенобетона на основе геополимеров, изучено влияние таких факторов как содержание пены, соотношение воды и вяжущего, жидкого стекла содержание и модуль жидкого стекла на производительность приготовления и

качество пенобетона. По результатам анализа отмечено, что наиболее важным фактором, влияющим на теплопроводность, является водовязущее отношение, за которым следовали содержание пены, модуль и концентрация жидкого стекла. При содержании пены 1,58 %, водовязущем отношении – 0,45, содержании жидкого стекла – 30 %, (модуль жидкого стекла 1,2), теплопроводность приготовленного геополимерного пенобетона достигает 0,044 Вт/(м·°С).

Таким образом, на основании литературного анализа было выявлено, что среди немало важных факторов обеспечения качественной структуры при получении ячеистых геополимерных бетонов является последовательность введения компонентов в сырьевую смесь. Данный параметр существенным образом влияет на эффективность производственного процесса и качество конечного продукта. Поэтому в рамках данного исследования произведена оценка эффективности использования разных способов приготовления сырьевой пенобетонной смеси с точки зрения формирования ячеистой структуры, а также физико-механических свойств конечного геополимерного пенобетонного композита.

Материалы и методы. В качестве основного алюмосиликатного сырья для синтеза образцов геополимерного пенобетона была использована зола-уноса низкокальциевая (согласно ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»), химический состав которой представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав используемых минеральных модификаторов

Модификатор	Содержание оксидов, масс. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	N ₂ O	п.п.п.
Зола-уноса	58,98	28,29	4,63	0,97	0,65	1	3,74	0,36	–	0,63	6,07
											2,08

Химический состав используемой золы-уноса определялся с помощью рентгено-флуоресцентного анализа на спектрометре WorkStation ARL 9900 (Thermo Scientific, USA), с использованием излучения Co-анода.

В рамках данного исследования в качестве щелочного активатора был использован гидроксид натрия NaOH (натрия гидроокись ЧДА), с основными техническими характеристиками, удовлетворяющими требованиям ГОСТ Р 55064-2012 «Натр едкий технический. Технические условия».

Для формирования поровой структуры в геополимерной вяжущей системе в рамках исследования был использован пенообразователь белковый Biofoam (производитель ООО «БиоФомм»).

Вода для проведения лабораторных исследований использовалась водопроводная, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-85 «Вода для бетонов и строительных растворов».

Оценка качества формирования ячеистой структуры затвердевших образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами, осуществлялась с помощью визуального анализа фотографий, снятых на цифровую камеру.

Основная часть. В рамках данного исследования было рассмотрено 5 способов приготовления геополимерной пенобетонной сырьевой смеси, которые отличаются последовательностью введения сырьевых компонентов (рис. 3). Для полученных разными способами пеномасс и образцов геополимерного пенобетона параллельно был произведен визуальный анализ их ячеистой структуры (рис. 4).

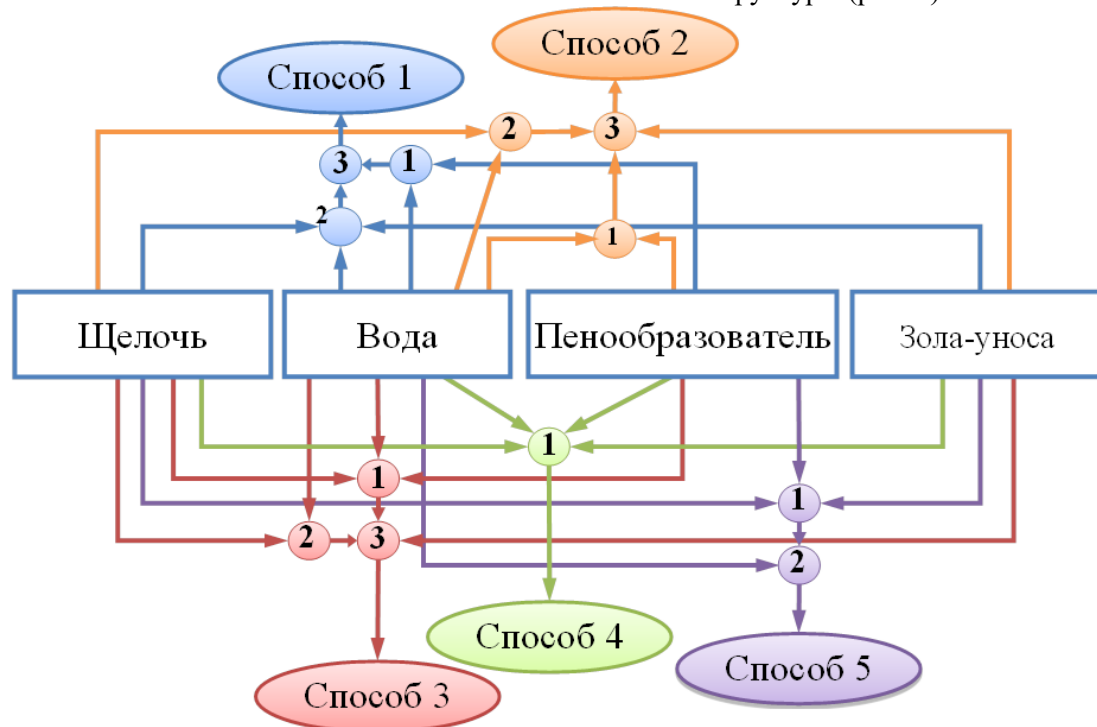


Рис. 3. Способы получения геополимерной пенобетонной смеси

Способ 1 предусматривает отдельное приготовление пены в нейтральной среде (путем смешения пенообразователя и воды) и геополимерного вяжущего (путем смешения воды, щелочи и золы-уноса). Согласно визуальному наблюдению, недостатком данного способа является неполное растворение щелочного компонента и его

неравномерное распределение в объеме смеси. Результатом является нарушенная поровая структура с широким разбросом пор по размеру. Кроме того, из-за флуктуаций щелочи, наблюдается наличие высолов на поверхности образца пенобетона (рис. 4, а).

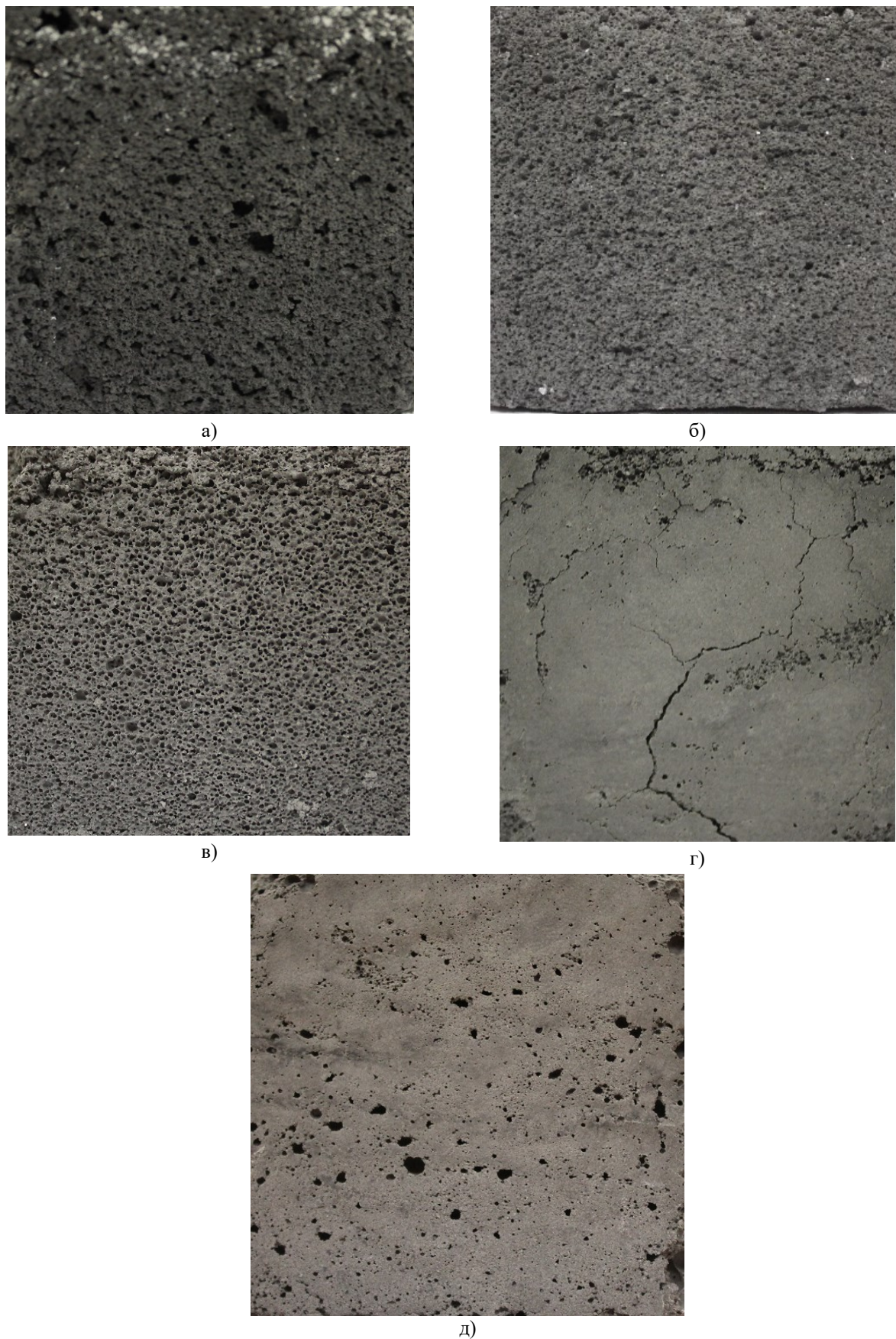


Рис. 4. Образцы геополимерного пенобетона, полученные разными способами:
а – Способ 1; б – Способ 2; в – Способ 3;
г – Способ 4; д – Способ 5

Способ 2 включает в себя 3 стадии: отдельное приготовление пены в нейтральной среде

(путем смешения пенообразователя и воды), приготовление щелочного раствора для вяжущего

(путем смешения щелочи и воды до полного растворения твердого компонента), активация золы-уноса щелочным раствором с последующим введением пены. Использование данного метода обеспечивает наиболее эффективное распределение компонентов в объеме смеси, а также оптимальную ячеистую структуру (рис. 4, б).

Способ 3 также предусматривает 3 стадии: приготовление щелочного раствора; о приготовление пены в щелочной среде (путем смешения пенообразователя и части щелочного раствора); приготовление вяжущей суспензии путем смешения оставшейся части щелочного раствора и золы-уноса, с последующим введением пены. С точки зрения особенностей формирующейся ячеистой структуры, *Способ 3* аналогичен *Способу 2*. Однако, с позиции технологического аспекта, в данном случае необходимо предусматривать стадию разделения и дополнительного дозирования щелочного раствора для приготовления пены (рис. 4, в).

Способ 4 предусматривает одну стадию, где все сырьевые компоненты смешиваются одновременно. Этот способ является более простым с технологической точки зрения, но наименее эффективным. При смешении всех компонентов одновременно пеномасса практически не формируется, в результате чего ячеистая структура формируется слабо (рис. 4, г).

Способ 5 состоит из двухстадийного введения компонентов в сырьевую смесь: смешение

твердофазных компонентов (зола-уноса и щелочь) и пенообразователя с последующим добавлением воды и дополнительными интенсивным перемешиванием. Этот способ также не позволяет получить желаемый объем пеномассы и, впоследствии, ячеистую структуру твердеющего образца (рис. 4, д).

Анализируя визуальные особенности образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами, следует отметить, что наиболее эффективным с точки зрения структуры сформированной пеномассы и оптимальным с точки зрения технологии, являются *Способ 2* и *Способ 3*.

Анализ структурно-механических и рецептурно-технологических особенностей геополимерных пенобетонных смесей и готовых изделий, полученных пятью различными способами последовательности введения компонентов (зола-уноса, щелочь, пенообразователь и вода) позволил проранжировать их по повышению эффективности в следующей последовательности: *Способ 4* → *Способ 5* → *Способ 1* → *Способ 3* → *Способ 2*.

Полученные затвердевшие образцы геополимерного пенобетона также были изучены по следующим основным эксплуатационным характеристикам: предел прочности на сжатие, средняя плотность и коэффициент теплопроводности. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики исследуемых экспериментальных образцов геополимерного пенобетона

Способ	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Марка по плотности	Коэффициент теплопроводности, Вт/м ² ·°С
1	0,74	711	D700	0,22
2	0,59	620	D700	0,112
3	0,53	615	D700	0,109
4	1,3	1200	D1200	0,45
5	1,06	987	D1000	0,32

Результаты физико-механических характеристик образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами введения сырьевых компонентов, показали, что особенности формируемой ячеистой структуры оказывают прямое влияние на показатели прочности на сжатие, средней плотности, а также коэффициента теплопроводности. Так, образцы пенобетона, полученные *Способами 2* и *3*, характеризуются схожей (при визуальной оценке, (рис. 4 б, в)) ячеистой структурой, однако, с более правильной округлой формой пор при использовании *Способы 3*. Также для этих способов характерны более низкие значения по средней плотности: 615 и

620 кг/м³; и коэффициенту теплопроводности: 0,109 и 0,112 Вт/м²·°С, при использовании *Способов 3* и *2*, соответственно. В тоже время, наиболее высокими показателями по средней плотности: 987 и 1200 кг/м³; и коэффициенту теплопроводности: 0,32 и 0,45 Вт/м²·°С характеризуются пенобетонные образцы, полученные *Способами 5* и *4*, соответственно, для которых наблюдаются глубинные трещины и практически полностью нарушена ячеистая структура (рис. 4 д, г). Показатели прочности на сжатие также имеют хорошую корреляцию со средней плотностью и коэффициентом теплопроводности для всех экспериментальных образцов (см. табл. 2).

Выводы. На основании проведённого исследования была установлена прямая зависимость качества формирующейся ячеистой структуры и физико-механических свойств геополимерного пенобетона от способа приготовления сырьевой пенобетонной смеси. Среди предложенных пяти способов приготовления сырьевой смеси наиболее эффективными были выявлены способы, в которых предусмотрено 3-х стадийное смешение компонентов: приготовление пены; приготовление водного щелочного раствора; приготовление геополимерной суспензии с последующим добавлением пены. В этом случае в образцах геополимерного пенобетона формируется наиболее эффективная и правильная ячеистая структура, а также выгодное сочетание показателей средней плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Andini S., Cioffi R., Colangelo F., Grieco T., Montagnaro F., Santoro L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products // *Waste Management*. 2008. Vol. 28. Issue 2. Pp. 416–423. doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.001.
- Van Jaarsveld J., Van Deventer J., Lukey G. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers // *Chemical Engineering Journal*. 2002. Vol. 89. Pp. 63–73. doi: 10.1016/S1385-8947(02)00025-6.
- You S., Ho W., Li T., Maneerung T., Wang C.-H. Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. Pp. 237–244. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.089.
- Santa R.A.A.B., Bernardin A.M., Riella H.G., Kuhnen N.C. Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 57. Pp. 302–307. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.017.
- Part W.K., Ramli M., Cheah C.B. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 370–395. doi: 10.1016/b978-0-12-804524-4.00011-7.
- Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Том 1. № 4. С. 38–43. doi: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43.
- Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers // *International Journal of Inorganic Materials*. 2000. Vol. 2. № 4. Pp. 309–317. doi: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6.
- Alex, T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 123. Pp. 102–107. doi: 10.1016/j.minpro.2013.06.001.
- Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin, France. 2011. 612 p.
- Кожухова Н.И., Строкова В.В., Чижов Р.В., Кожухова М.И. Методика оценки реакционной активности алюмосиликатов кислого состава с нанокристаллической структурой // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т.2. № 3. С. 5–11. doi: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-5-11.
- Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.
- Rickard W.D., Williams R., Temuujin J., Van Riessen A. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. Issue 9. Pp. 3390–3397. doi: 10.1016/j.msea.2011.01.005.
- Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-direct electric curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.041.
- Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.135.
- Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N., Ogurtsova Yu.N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 552. № 012035. doi: 10.1088/1757-899X/552/1/012035.

16. Bernal S.A., Bejarano J., Garzon C., Mejia de Gutierrez R., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites // *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1919–1928. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.02.027.
17. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers // *Materials and Design*. 2017. Vol. 116. Pp. 374–385. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.039.
18. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
19. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
20. Lecomte M., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R., Maseri F. Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag // *Journal of Materials Research*. 2003. Vol. 18. Issue 11. Pp. 2571–2579. doi: 10.1557/jmr.2003.0360.
21. Palmero P., Formia A., Antonaci P., Brini S., Tullinari J.-M. Geopolymer technology for application oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Issue 10. Pp. 12967–12979. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.06.140.
22. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. Issue 14. Pp. 16103–16118. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.
23. Bai C., Li H., Bernardo E., Colombo P. Waste-to-resource preparation of glass-containing foams from geopolymers // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Issue 6. Pp. 7196–7202. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.12.227.
24. Yin P., Pang H., Jiang X., Jin H., Cheng Y. Ground polymers foam concrete and preparation method thereof. Патент № CN201710279623.0A. 2017-09-22.
25. Cong M., Zhang Sh., Sun D., Zhou K. Optimization of Preparation of Foamed Concrete Based on Orthogonal Experiment and Range Analysis // *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. 778173. doi:10.3389/fmats.2021.778173.

Информация об авторах

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

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

Коломыцева Анна Ивановна, магистрант, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: anna.kolomytseva@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мануйлова Анна Игоревна, магистрант, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: anna.manuilova.00@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель, кафедра высшей математики. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.06.2022 г.

© Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В., 2022

***Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kolomytseva A.I., Manuilova A.I., Zhernovskaya I.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF GEOPOLYMER FOAM CONCRETE WITH DIFFERENT METHODS OF PREPARING A CELLULAR RAW MIXTURE

Abstract. *It is known that the quality of a concrete composite, especially a cellular one, largely depends not only on the properties of the original raw materials but also on many technological factors, which are often decisive. In particular, this is relevant when forming a cellular structure. This article discusses the influence of various methods of preparing a cellular raw mixture in the synthesis of geopolymer foam concrete on the features of the formation of its cellular structure, as well as its physical and mechanical properties. Visual analysis was used to assess the quality of formation of the cellular structure. It has been established that for the preparation of a geopolymer cellular raw mixture, 2 methods were identified as the most effective, in which a 3-stage mixing of components is provided: preparation of an aqueous alkaline solution; preparation of foam; preparation of a geopolymer suspension followed by the addition of foam. It was found that when using both methods with a 3-stage mixing of components, samples of geopolymer foam concrete contribute to providing the lowest values for such physical characteristics as average density: 615–620 kg/m³; and thermal conductivity coefficient: 0.109–0.112 W/m²·°C. At the same time, the least effective methods of preparing a raw mixture are a one-stage mixing of components, in which an almost destroyed cellular structure is observed and, as a result, unsatisfactory indicators of physical and mechanical properties.*

Keywords: *geopolymer foam concrete, raw cellular mixture preparation method, cellular structure, physical and mechanical properties.*

REFERENCES

1. Andini S.R., Cioffi F., Colangelo T., Grieco F., Montagnaro L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Management*. 2008. Vol. 28. Issue 2. Pp. 416–423. doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.001.
2. Van Jaarsveld J., Van Deventer J., Lukey G. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*. 2002. Vol. 89. Pp. 63–73. doi: 10.1016/s1385-8947(02)00025-6.
3. You S., Ho W., Li T., Maneerung T., Wang C.-H. Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. Pp. 237–244. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.089.
4. Santa R.A.A.B., Bernardin A.M., Riella H.G., Kuhn N.C. Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 57. Pp. 302–307. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.017.
5. Part W.K., Ramli M., Cheah C.B. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 370–395. doi:10.1016/b978-0-12-804524-4.00011-7.
6. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovskiy I.V. Structure formation in alkali activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials with different crystallinity degree [Strukturoobrazovanie v shchelochekativirovannykh alyumosilikatnykh vyazhushchih sistemakh s ispol'zovaniem prirodnogo syr'ya razlichnoy kristallichnosti]. *Construction Materials and Products*. 2018. 1(4). Pp. 38–43. doi: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43 (rus).
7. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysilicate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*. 2000. Vol. 2. No. 4. Pp. 309–317. doi: 10.1016/s1466-6049(00)00041-6.
8. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 123. Pp. 102–107. doi:10.1016/j.minpro.2013.06.001.
9. Davidovits J. *Geopolymer chemistry and applications*: Saint-Quentin. France. 2011. 612 p.
10. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Chizhov R.V., Kozhukhova M.I. Chemical reactivity assessment method of nanostructured low calcium aluminosilicates [Metodika ocenki reakcionnoy aktivnosti alyumosilikatov kislogo sostava s nanokristallicheskoy strukturoj]. *Construction Materials and Products*. 2019. 2 (3). Pp. 5–1. doi:10.34031/2618-7183-2019-2-3-5-11 (rus).
11. Shekhovtsova J., Zhernovskiy I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization. *Journal of Cleaner*

Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.

12. Rickard W.D., Williams R., Temuujin J., Van Riessen A. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. Issue 9. Pp. 3390–3397. doi:10.1016/j.msea.2011.01.005.

13. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-direct electric curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.041.

14. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.135.

15. Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N., Ogurtsova Yu. N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 552. 012035. doi: 10.1088/1757-899x/552/1/012035.

16. Bernal S.A., Bejarano J., Garzon C., Mejia de Gutierrez R., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1919–1928. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.02.027.

17. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers. *Materials and Design*. 2017. Vol. 116. Pp. 374–385. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.039.

18. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.

19. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.

20. Lecomte M., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R., Maseri F. Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Research*. 2003. Vol. 18. Issue 11. Pp. 2571–2579. doi: 10.1557/jmr.2003.0360.

21. Palmero P., Formia A., Antonaci P., Brini S., Tullinari J.-M. Geopolymer technology for application oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Issue 10. Pp. 12967–12979. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.06.140.

22. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. Issue 14. Pp. 16103–16118. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

23. Bai C., Li H., Bernardo E., Colombo P. Waste-to-resource preparation of glass-containing foams from geopolymers. *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Issue 6. Pp. 7196–7202. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.12.227.

24. Yin P., Pang H., Jiang X., Jin H., Cheng Y. Ground polymers foam concrete and preparation method thereof. Patent No CN201710279623.0A. 2017-09-22.

25. Cong M., Zhang Sh., Sun D., Zhou K. Optimization of Preparation of Foamed Concrete Based on Orthogonal Experiment and Range Analysis. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. 778173. doi:10.3389/fmats.2021.778173.

Information about the authors

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

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

Kolomytseva, Anna I. Master student, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: anna.kolomytseva@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Manuilova, Anna I. Master student, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: anna.manuilova.00@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Zhernovskaya, Irina V. Senior lecturer, Department of Advanced Mathematics. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 20.06.2022

Для цитирования:

Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В. Формирование структуры и свойств геополимерного пенобетона при разных способах приготовления ячеистой сырьевой смеси // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18

For citation:

Kozhukhova N.I., Strokov V.V., Kolomytseva A.I., Manuilova A.I., Zhernovskaya I.V. Formation of the structure and properties of geopolymer foam concrete with different methods of preparing a cellular raw mixture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29

***Винокурова О.В., Баранова А.А.**

Ангарский государственный технический университет

*E-mail: neitrino.78@mail.ru

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОБЕТОНА

Аннотация. В статье рассмотрено влияние водоцементного отношения на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности D300. Основанием для анализа послужило противоречие между полученной опытным путём прямой зависимостью прочности пенобетона от водоцементного отношения и практикой усовершенствования структуры материала за счет водоредуцирования. Представлен расчёт оптимального количества воды в пенобетонной смеси, основанный на методе абсолютных объёмов. В расчёт включена формула определения объёма межпорового пространства в зависимости от толщины межпоровой перегородки, диаметра ячейки и вида упаковки. Результаты вычислений подтверждаются фактическими показателями, собранными в ходе эксперимента. Влияние количества воды в пенобетонной смеси на качество пенобетона оценивали прочностью при сжатии и характером макроструктуры материала. Прочность определяли разрушающим методом. При исследовании структуры использован оптический микроскоп в сочетании с программным обеспечением обработки изображения. Наибольшей прочностью обладает материал с толщиной перегородки, превышающей максимальный размер цементного зерна при условии равенства объёма межпорового пространства и суммы абсолютных объёмов компонентов пенобетонной смеси. Структура с замкнутыми порами и плотными межпоровыми перегородками наблюдается в пенобетоне на белковом пенообразователе при водоцементном отношении с учётом воды в пене равном 0,7.

Ключевые слова: водоцементное отношение, макроструктура, диаметр пор, проектирование состава, теплоизоляционный пенобетон.

Введение. В условиях жёсткой конкуренции и экономии затрат поверхностно-активные вещества (ПАВ) получили широкое распространение в качестве компонентов, используемых с целью снижения веса изделий и теплопроводности конструкций. Повышение требований к уровню теплозащиты увеличивает спрос на пеноматериалы. Одним из них является пенобетон на минеральном вяжущем [1–3]. Однако, до сих пор нет чётко сформулированных законов, которые бы легли в основу проектирования состава пенобетона с эксплуатационными показателями, отвечающими современным условиям.

Незначительный объём твёрдых компонентов и увеличение содержания пенообразователя, снижающего смачиваемость поверхности гидратационных вяжущих, требуют для построения структуры пенобетона пониженной плотности достаточного количества воды. Согласно исследованиям [4], при увеличении водоцементного отношения (В/Ц) теплоизоляционного пенобетона наблюдается оптимизация макроструктуры и рост прочности материала.

С другой стороны, одной из распространенных технологических мер в решении ряда проблем, имеющих место при получении материала (усадовые трещины, неоднородность характеристик конечного продукта и потеря устойчивости вспененной массы) является водоредуциро-

вание. Так, по данным публикации [5], разработанный способ изготовления пенобетона, основой которого является двухстадийное вспенивание, позволяет снизить В/Ц и повысить качество структуры. Многочисленные исследования и в области усовершенствования пенобетона за счет использования комплексных модификаторов из мелкодисперсных наполнителей и пластифицирующих добавок [6–9].

Между тем, назначение количества воды в пенобетонной смеси без учета степени заполнения межпорового пространства чревато недоиспользованием потенциала вяжущего компонента и снижением качества продукции. Особенно это касается пенобетона пониженной плотности, где объём твердых компонентов ничтожно мал.

Чтобы правильно сориентироваться в многообразии предложений по модификации пенобетона необходимо дать определение оптимального количества воды в пенобетонной смеси, обозначить и исследовать факторы, влияющие на ее значение, например, параметры макроструктуры материала.

Одним из условий проявления вяжущих свойств является наличие хорошо смачиваемой дисперсионной среды [10]. При этом смачиваемость поверхности обеспечивается как особенностями дисперсионной среды – полярной жидкости, так и спецификой смачиваемой поверхности. Так как межпоровое пространство в пенобетоне

ограничено наличием молекул пенообразователя, то при сужении толщины межпоровой перегородки в результате исключения доли воды возможно изменение поверхностных свойств вяжущего компонента. В связи с чем, толщина перегородки, размер пор и их упаковка приобретают решающую роль в назначении В/Ц пенобетонной смеси [11, 12].

Полагаем, что при планировании состава пенобетона необходимо исходить не только из характеристик сырьевых компонентов, но и заданных параметров микро, макроструктур материала, с учётом необходимых условий для их образования. Развитие математического моделирования и решение задач плотной упаковки [13–20] позволяют осуществить такой подход к проектированию состава пенобетона. Если в области производства тяжёлого бетона, подбору зернового состава заполнителя уделено достаточно внимания [21, 22], на предмет сокращения расхода цемента и воды, то в пенобетоне эта тема почти не затронута.

Для установления оптимального количества воды в пенобетонной смеси были проведены испытания пенобетона марки по средней плотности D300. На основе результатов исследования структуры образцов выведена зависимость между параметрами макроструктуры материала и его водоцементным отношением.

Материалы и методы. В качестве исходных компонентов использованы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Ангарскцемент», синтетический пенообразователь «Пентапав 430А», пенообразователь на белковой основе Biofoam.

Пенобетон изготавливали по раздельной технологии с различным объёмом раствора смеси, в котором варьировалось количество воды затворения при фиксированной концентрации рабочего раствора пенообразователя.

Прочность образцов пенобетона определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180.

Параметры структуры устанавливали с помощью микроскопа Levenhuk с цифровой камерой Levenhuk M200 BASE и программного обеспечения обработки изображения LevenhukLite 4.11.

Макропористость пенобетона характеризовалась следующими показателями:

- диаметром ячейки и толщиной межпоровой перегородки (средним, максимальным и минимальным значением), среднее значение определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (1)$$

- средним квадратичным отклонением в значениях диаметра ячеек и толщины перегородок:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}; \quad (2)$$

- коэффициентом вариации (изменчивости) значения диаметра ячеек и толщины перегородки:

$$CV_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}. \quad (3)$$

Диаметр пор и толщину перегородки измеряли по сечению в плоскости среза. Замеры производились до получения не менее 300 значений. Для исключения ошибки в пространственной интерпретации в выборку измерений диаметра ячейки и толщины перегородки включали поры, имеющие глубину близкую к их радиусу.

Основная часть. В начале исследования была произведена серия испытаний образцов пенобетона на основе пенообразователей синтетической и белковой природы, с целью получения набора данных, характеризующих влияние параметров пены на формирование цементного камня при различном водоцементном отношении раствора. Результаты работы опубликованы ранее [23, 24], но некоторые из них сведения, необходимые для дальнейшего рассмотрения вопроса, а именно составы и показатели испытаний пенобетона на прочность представлены ниже: при использовании синтетического пенообразователя – в таблице 1, белкового – в таблице 2.

Из результатов испытаний следует, что с увеличением В/Ц смеси до 0,8 прочность пенобетона на синтетическом пенообразователе повышается (табл. 1), независимо от источника поступления воды, которым является пена или раствор. Дальнейшее увеличение количества воды в смеси особо не оказывает влияние на характеристику.

Значения прочности пенобетона на белковом пенообразователе Biofoam выше, чем на синтетическом (табл. 2). Возможно, это обусловлено строением и размером молекул белкового пенообразователя, позволяющих сохранить положение ПАВ на границе раздела воздух-вода и снизить степень его адсорбции на зернах цемента. При этом тенденция роста прочности при повышении воды в смеси не меняется, наибольшее значение достигается при максимально возможном В/Ц, равном 0,7. Дальнейшее увеличение воды в смеси на основе белкового пенообразователя Biofoam приводит к потере устойчивости вспененной массы.

Таблица 1

Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430»

Состав на 1 м³ пенобетонной смеси, кг				Распływ раствора по Сутгарду, см	В/Ц смеси (с учётом воды в пене)	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м³
пена		раствор					
Пентапав 430А	вода	цемент	вода				
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 9 % (кратность 33)							
1,30	13,0	265	159	22	0,65	0,06	271
1,20	12,0	265	175	30	0,71	0,372	293
1,01	10,1	265	191	33	0,76	0,477	311
1,03	10,3	265	207	38	0,82	0,490	298
0,86	8,6	265	222	41	0,87	0,492	307
0,87	8,7	265	238	43	0,94	0,512	313
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 2 % (кратность 28)							
0,49	24,5	265	159	22	0,69	0,135	305
0,46	23,0	265	175	30	0,75	0,316	288
0,47	23,5	265	191	33	0,81	0,507	286
0,39	19,5	265	206	38	0,85	0,449	307
0,44	22,0	265	223	41	0,92	0,468	301
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 1 % (кратность 15)							
0,48	43,2	265	143	20	0,70	0,379	283
0,53	47,7	265	159	22	0,78	0,415	289
0,41	36,9	265	175	30	0,80	0,563	301
0,39	35,1	265	191	33	0,85	0,473	299
0,33	29,7	265	207	38	0,89	0,493	313

Таблица 2

Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на белковом пенообразователе Biofoam

Состав на 1м³ пенобетонной смеси, кг				Распływ раствора по Суттарду, см	В/Ц смеси (с учётом воды в пене)	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м³
пена		раствор					
Biofoam	вода	цемент	вода				
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 9 % (кратность 10)							
6,15	61,5	245	74	6	0,58	0,335	258
5,89	58,9	245	81	6	0,59	0,366	270
6,17	61,7	245	88	6	0,64	0,529	296
5,71	57,1	245	96	7	0,65	0,763	274
6,30	63,0	245	103	9	0,70	0,783	270

Фактическая структура пенобетона с В/Ц, обеспечивающим максимальную прочность, как правило, представлена:

- сферическими ячейками при использовании «Пентапав 430А» (рис. 1 а),

- ячейками многогранника при использовании белкового пенообразователя Biofoam (рис. 1 б).

При низком значении В/Ц структура пенобетона на обоих пенообразователях имеет рваный характер (рис. 1 в, г).

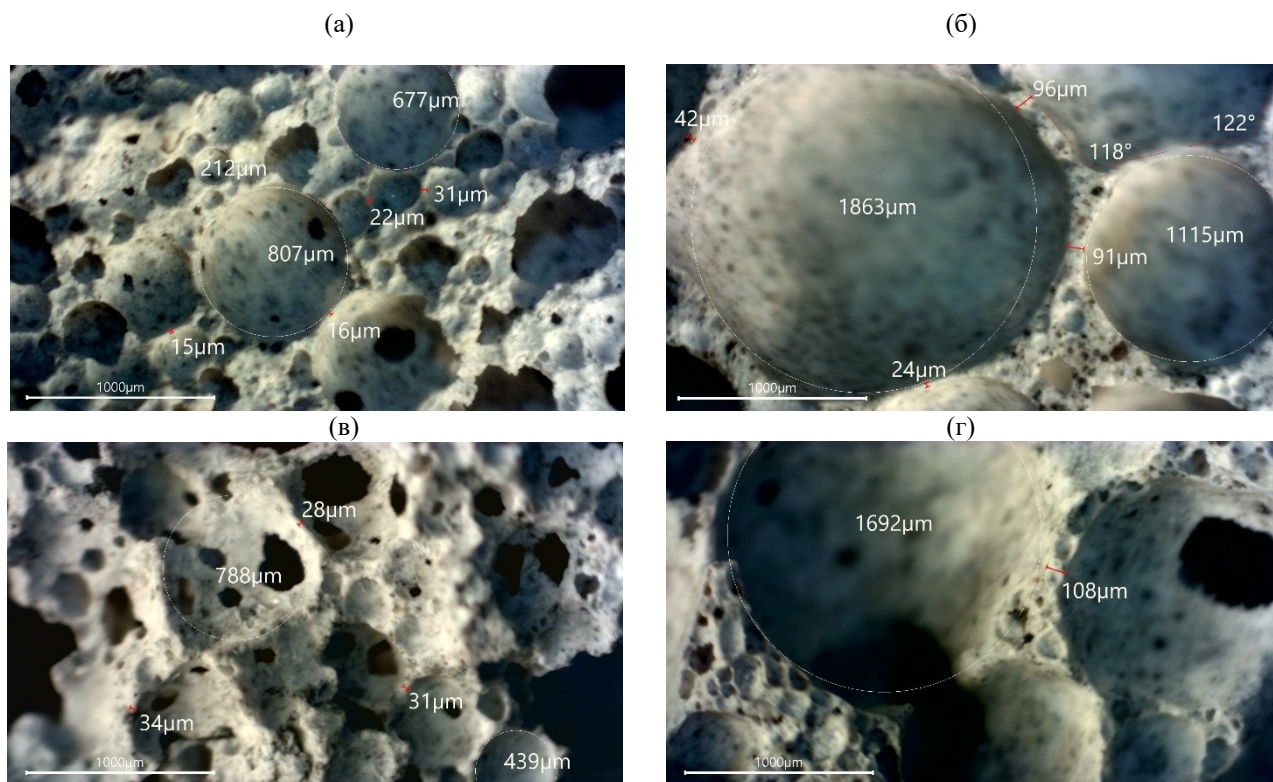


Рис. 1. Фотография структуры пенобетона марки по средней плотности D300 на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А» (а) – с В/Ц = 0,85, (в) – с В/Ц = 0,65 и белковом пенообразователе Biofoam (б) – с В/Ц = 0,7, (г) – с В/Ц = 0,58. Увеличение в 20 раз

При избытке молекул пенообразователя в растворе, адсорбционные слои его молекул на зернах цемента могут замедлить и даже прекратить процессы гидратации вяжущего [25]. Данное утверждение подтверждается результатами, представленными в таблице 1, с повышением концентрации рабочего раствора пенообразователя и кратности пены усиливается негативное влияние снижения количества воды в цементном растворе смеси на прочность материала. Прочность пенобетона с В/Ц смеси равным 0,65 и при использовании рабочего раствора синтетического пенообразователя с концентрацией 9 % составляет всего 0,06 МПа.

Из вышеизложенного следует, что для нормального течения процессов гидратации диаметр зерна цемента должен быть меньше толщины межпоровой перегородки, а само зерно окружено прослойкой дисперсионной среды с низким содержанием молекул пенообразователя. Данное условие в пенобетонной системе может быть обеспечено если зерно цемента находится в среднем слое пенной пленки, в котором согласно общепринятому представлению о трехслойном ее строении, концентрация пенообразователя незначительна [26]. При этом межпоровое пространство должно быть абсолютно заполненным, в противном случае произойдет сужение среднего слоя дисперсионной среды в результате ее перераспределения внутри системы.

Поскольку масса твёрдых компонентов пенобетона ограничена его заданной плотностью, абсолютное заполнение межпорового пространства обеспечивается водой, объём которой для 1 м³ пенобетонной смеси рассчитывается по формуле:

$$B = V_k - \frac{P_v}{\rho_v} - \frac{P_n}{\rho_n}, \quad (4)$$

где B – количество воды в пенобетонной смеси, м³;

V_k – объём межпорового пространства (объём каркаса) в 1 м³ пенобетонной смеси, м³

P_v – расход вяжущего компонента на 1 м³ пенобетонной смеси, кг;

ρ_v – истинная плотность вяжущего компонента, кг/м³;

P_n – расход наполнителя на 1 м³ пенобетонной смеси, кг;

ρ_n – истинная плотность наполнителя, кг/м³.

Только при таком значении объёма воды в пенобетонной смеси, может быть использован заложенный в вяжущий компонент потенциал.

При меньшем количестве воды заполнения межпорового пространства не происходит, так как объёма жидкости и твёрдых компонентов не хватает (рис. 1 в).

В отсутствии среднего слоя смачиваемой среды цементное зерно, адсорбирует сконцентрированные на границе воздух-вода молекулы

пенообразователя и становится обычным минерализатором пены. При увеличении концентрации водного раствора пенообразователя гидрофобная адсорбционная оболочка ПАВ на зернах цемента утолщается, нарушая ход его твердения [25]. Прочность пенобетона снижается.

В свою очередь, объём межпорового пространства V_k , обусловленный диаметром зерна вяжущего, зависит от следующих факторов: размера, вида упаковки и формы пор.

С энергетической точки зрения наиболее предпочтительна структура с одномерным распределением ячеек одинакового размера. Так как абсолютно заполнить трёхмерное пространство ячейками сферической формы невозможно, представим объём межпорового пространства V_k как сумму объёмов покрытия пор и пространства между плотноупакованными ячейками без учёта перегородки:

$$V_k = V_n + V_y, \quad (5)$$

где V_n – объём покрытия пор, м^3 ;

V_y – объём пространства между плотноупакованными ячейками, без учёта перегородок, м^3 .

Объём покрытия пор V_n равен произведению объёма покрытия одной поры на их количество:

$$V_n = V_{n.я.} \cdot N \cdot 10^{-9}, \quad (6)$$

где $V_{n.я.}$ – объём покрытия одной поры, мм^3 ;

N – количество пор в объеме материала, шт.

Объём покрытия одной поры выразим через толщину межпоровой перегородки t как разницу между объёмом ячейки радиусом $\left(r + \frac{t}{2}\right)$ и объёмом поры радиусом r :

$$V_{n.я.} = V_t - V_y, \quad (7)$$

где V_t – объём ячейки радиусом $\left(r + \frac{t}{2}\right)$, мм^3 ;

$\frac{t}{2}$ – толщина покрытия поры радиусом r , мм ;

V_y – объём одной поры радиусом r , мм^3 .

Количество пор в 1 м^3 пенобетонной смеси найдём из выражения:

- третьего порядка

$$V_{n2} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(0,414r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} (0,414r)^3 \right] \cdot \frac{0,065 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} (0,414r)^3}, \quad (12)$$

- второго порядка

$$V_{n3} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(0,224r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} (0,224r)^3 \right] \cdot \frac{0,020 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} (0,224r)^3}, \quad (13)$$

где r – радиус поры первого порядка, мм ;

t – толщина перегородки, мм ;

(0,915), (0,065), (0,02) – доля общей пористости, приходящаяся на ячейки первой, второй и третьей размерности соответственно.

$$N = \frac{(1 - V_k) \cdot 10^9}{V_y}. \quad (8)$$

Плотность одномерной гексагональной упаковки шаров в трёхмерном пространстве составляет 74 % [27]. Однако реальная структура пенобетона на синтетическом пенообразователе представлена сферическими ячейками разного диаметра. В пенобетоне, изготовленном с применением Biofoam, поры частично трансформированы в многогранники.

Плотность гексагональной упаковки одинаковых шаров радиусом R возрастет до 80,9 % при заполнении октаэдрических и тетраэдрических пустот шарами размером $0,414R$ и $0,224R$ соответственно. При такой упаковке объём межпорового пространства в 1 м^3 пенобетонной смеси может быть представлен формулой:

$$V_k = \sum_{i=1}^3 V_{ni} + 0,191, \quad (9)$$

где V_{ni} – объём покрытия пор соответствующего порядка размерности, м^3 ;

i – порядок размерности поры;

0,191 – объём пространства между плотноупакованными порами без учёта перегородки между ними, м^3 .

Объём покрытия пор i -ого порядка V_{ni} равен произведению объёма покрытия одной поры i -ого порядка на количество пор соответствующего порядка:

$$V_{ni} = V_{n.я.i} \cdot N_i \cdot 10^{-9}, \quad (10)$$

где $V_{n.я.i}$ – объём покрытия одной поры i -ого порядка, мм^3 ;

N_i – количество пор соответствующего i -ого порядка, шт.

Так как на один шар в гранецентрированной упаковке приходится одна октаэдрическая и две тетраэдрические пустоты, то объём покрытия пор в 1 м^3 пенобетонной смеси составит:

- первого порядка

$$V_{n1} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} r^3 \right] \cdot \frac{0,915 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} r^3}, \quad (11)$$

- второго порядка

С гранецентрированной трёхмерной упаковкой сферических ячеек пористость увеличивается всего до 80,9 %, при этом повышается площадь поверхности границы вода-воздух. В связи

со стремлением системы к уменьшению поверхностной энергии, при увеличении пористости смеси свыше 75÷80 %, сферические поры трансформируются в многогранники.

Если принять за идеализированную форму ячеек, деформированных в многогранники, правильный додекаэдр, а плотность их упаковки 85,9 % [28], то преобразованная формула объёма межпорового пространства в 1 м³ пенобетонной смеси примет вид:

$$V_K = 1 - \frac{0,859}{\left(\frac{t}{2r_g} + 1\right)^3}, \quad (14)$$

где r_g – радиус вписанной сферы в ячейку формы правильного додекаэдра, мм.

Применим расчётную математическую модель для анализа влияния параметров макроструктуры на формирование цементного камня и сравним полученные результаты с экспериментальными данными.

Используя формулы (4, 9–13), найдём соотношение между В/Ц, толщиной перегородки и радиусом пор в пенобетоне марки по средней плотности D300 при гранецентрированной упаковке с трёхмерным характером распределения сферических ячеек (рис. 2). В расчёте примем условия опыта (табл. 1), где для изготовления пенобетона использован портландцемент с истинной плотностью 3100 кг/м³ в количестве 265 кг на 1 м³ пенобетонной смеси.

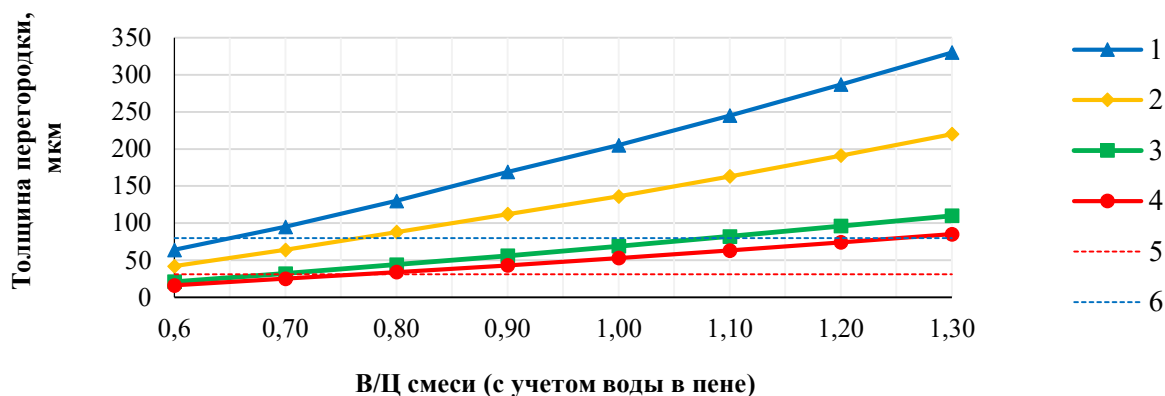
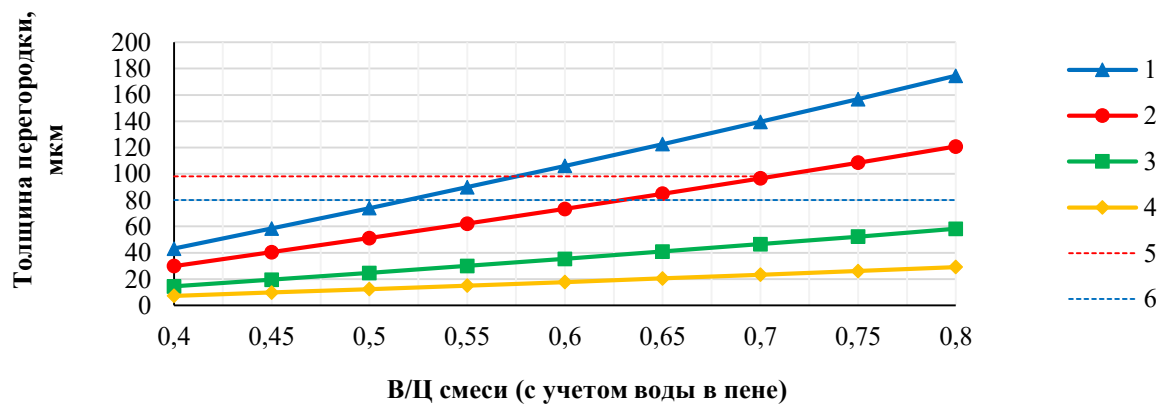


Рис. 2. Зависимость толщины межпоровой перегородки t в пенобетоне марки по средней плотности D300 от В/Ц (с учётом воды в пене) и среднего диаметра поры $\bar{d}$ при трёхмерной гексагональной упаковке сферических ячеек: 1 – $\bar{d} = 1,5$ мм, 2 – $\bar{d} = 1$ мм, 3 – $\bar{d} = 0,5$ мм, 4 – $\bar{d} = 0,38$ мм, 5 – $t = 30$ мкм, 6 – $t = 80$ мкм

При трансформации сферических ячеек в многогранники, результаты расчета зависимости между параметрами макроструктуры и значением В/Ц смеси по формулам (4, 14) в пенобетоне марки по средней плотности D300, представлены

на рисунке 3. Исходные данные, соответствуют условиям опыта таблицы 2: для изготовления пенобетона использован портландцемент с истинной плотностью 3100 кг/м³ в количестве 245 кг на 1 м³ пенобетонной смеси.

Рис. 3. Зависимость толщины межпоровой перегородки t в пенобетоне марки по плотности D300 от В/Ц (с учётом воды в пене) и диаметра вписанной сферы d_g в правильный додекаэдр при деформации пор:



1 – $d_g = 3$ мм, 2 – $d_g = 2,075$ мм, 3 – $d_g = 1$ мм, 4 – $d_g = 0,5$ мм, 5 – $t = 98$ мкм, 6 – $t = 80$ мкм

Информация, полученная на основе расчета, подтверждает результаты эксперимента и позволяет проследить причинно-следственные связи

между исходными данными сырьевых компонентов и конечными характеристиками продукта.

Значения фактических параметров макроструктуры образцов (табл. 3, 4) и оптимального водоцементного отношения пенобетона (табл. 1, 2) согласуются с зависимостью, представленной на рисунке 2 и 3.

В случае пенобетона на синтетическом пенообразователе, для образования структуры, имеющей толщину перегородки 30 мкм и гранецентрированную трехмерную упаковку сферических пор со средним диаметром 0,384 мм, согласно результатам расчета, требуется В/Ц равное 0,77.

Так как размер зерна рядового портландцемента колеблется в пределах от 0 до 80 мкм, толщина перегородки 30 мкм не обеспечивает условие абсолютного заполнения межпорового пространства. Вывод подтверждается фотографией структуры пенобетона (рис. 1а), на которой видны раковины и сообщающиеся поры. Со значением толщины перегородки 80 мкм соотносится В/Ц равное 1,26 (рис. 2). Поэтому при В/Ц менее 0,8 фиксируются низкие прочностные показатели пенобетона, а при В/Ц равном 0,8 и более, они имеют стабильно высокие значения.

Таблица 3

Диаметр ячейки структуры образцов пенобетона

Кратность пены	В/Ц	Диаметр ячейки, мкм			Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации
		средний	максимальный	минимальный		
		$\bar{d}$	d_{max}	d_{min}		
Пенобетон на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А»						
33	0,87	412	2294	73	363	0,88
28	0,85	364	1781	85	259	0,71
15	0,85	384	1504	87	266	0,69
Пенобетон на белковом пенообразователе Biofoam						
10	0,70	2075	3563	486	713	0,34

Таблица 4

Толщина межпоровой перегородки структуры образцов пенобетона

Кратность пены	В/Ц	Толщина перегородки, мкм			Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации
		средняя	максимальная	минимальная		
		$\bar{t}$	t_{max}	t_{min}	σ_t	CV_t
Пенобетон на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А»						
33	0,87	29	83	15	9	0,31
28	0,85	29	79	12	8	0,29
15	0,85	31	68	15	7	0,24
Пенобетон на белковом пенообразователе Biofoam						
10	0,7	98	345	33	49	0,5

В случае трансформации пор в многогранники с радиусом вписанной сферы 2,075 мм при толщине перегородки 80 мкм по данным расчёта требуется В/Ц равное 0,63.

Фактическое среднее значение межпоровой перегородки пенобетона на основе Biofoam с максимальным водоцементным отношением равным 0,7 составляет 98 мкм. Полученное опытным путем, соотношение размера пор, толщины перегородки и В/Ц не противоречит зависимости, определенной на основании расчета. На фотографии структуры данного материала (рис. 1 б)

наблюдаются замкнутые поры с глянцевой поверхностью и плотными межпоровыми перегородками.

Макроструктура пенобетона на Biofoam с В/Ц равным 0,7 отвечает ранее принятым условиям, первое из которых – толщина перегородки превышает максимальный размер зерна цемента, второе – условие равенства объема межпорового пространства и суммы абсолютных объемов сырьевых компонентов смеси. При этом максимальная прочность материала 0,78 МПа выше по сравнению с пенобетоном на синтетическом пенообразователе, где данные условия не соблюдены.

При низком В/Ц макроструктура пенобетона на белковом пенообразователе представлена раковинами (рис. 1 г). С увеличением В/Ц прослеживается переход от неоформленной структуры к структуре с отдельными, не сообщающимися порами в форме шара или многогранника.

Выводы.

1. Оптимальное количество воды в пенобетонной смеси зависит от объёма межпорового пространства и доли заполнения его твёрдыми компонентами.

2. Тонкость помола вяжущих компонентов, диаметр воздушных ячеек и их упаковка определяют объём межпорового пространства в пенобетонной смеси.

3. Пенообразователь и кратность пены должны быть согласованы с тонкостью помола твёрдых компонентов.

Реальная структура пенобетона более сложна и разнообразна, чем принятая в расчёте, поэтому в статье предпринята лишь попытка учесть в математической модели основные принципы физико-химических процессов, происходящих при формировании материала.

Надеемся, что представленная работа установит задел для разработки более точного метода. Поскольку, подход к проектированию состава теплоизоляционного пенобетона на минеральном вяжущем в зависимости от макроструктуры материала позволяет подобрать необходимые параметры вяжущих компонентов, а при наличии сырья спрогнозировать структуру и свойства будущего материала. Проведённые расчёты и опыты показывают эффективность управления параметрами макроструктуры для оптимизации строения цементного камня, составляющего каркас пенобетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao W., Huang J., Su Q., Liu T. Models for Strength Prediction of High-Porosity Cast-In-Situ Foamed Concrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 2. Pp. 1–10. DOI:10.1155/2018/3897348.
2. Decký M., Drusa M., Zgútová K., Blaško M., Hájek M., and Scherfel W. Foam concrete as new material in road constructions // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 428–433. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.585.
3. Fu Y., Wang X., Wang L., Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–25. DOI: 10.1155/2020/6153602.
4. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete // *Advances in materials science and*

engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/9520294.

5. Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utegov Ye.B., Bazarbayev D.O, Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B., Shakhmov Zh.A. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.

6. Стещенко А.Б. Кудяков А.И. Пенобетон с пластифицирующими и микроармирующими добавками // *ALITinform*. 2018. №3 (52). С. 26–40.

7. Vu K.D., Bazhenova S.I. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10311. DOI: 10.34910/MCE.103.11.

8. Abd Elrahman M., El Madawy M. E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. №7. 1447. DOI:10.3390/app9071447.

9. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Baranov A.V., Alaskhanov A.Kh., Svintsov A.P. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Is. 8(100). 10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3.

10. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л.: Стройиздат, 1974. 80 с.

11. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. Stability and instability of foamed concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2015. Vol. 68. №11. Pp. 1–8. DOI:10.1680/mac.15.00097.

12. Zhao J., Deng Y., Gao P., Lu X., Zhang J., Zong J. Pore Structure, Morphology, and Strength of Self-Compacting Foam Material Backfilled Behind the Underground Pipe-Wall of Yellow River // *Materials*. 2020. Vol. 13. №24. 5724. DOI:10.3390/ma13245724.

13. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Modeling structures of open cell foams // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 131. Pp.1–30. DOI: 10.1016/j.comatsci. 2017.01.029.

14. Kudryavtsev P.G. Structure of pores in solid porous bodies. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018. Vol. 10. № 5. Pp. 80–103 DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103. (rus).

15. Kubala P. Random sequential adsorption of Platonic and Archimedean solids // *Physical Review E*. 2019. Vol. 100. №4. 042903. DOI:10.1103/PhysRevE.100.042903.

16. Skibinski J., Cwieka K., Wejrzanowski T., Kurzydowski K. Design of Mechanical Properties of Open-Cell Porous Materials Based on μ CT Study of Commercial Foams // *MATEC Web of Conferences*.

2015. Vol. 30. 03005. DOI: 10.1051/mateconf/20153003005.

17. Jin Y., Yoshino H. A jamming plane of sphere packings // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2021. Vol. 118. №14. Pp. 1–8. DOI:10.1073/pnas.2021794118.

18. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of Pore Structure of Microbial Foam Concrete and Its Influence on Properties // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2021. Vol. 14. №3. Pp. 158–166. DOI:10.25103/jestr.143.18.

19. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. №6. 550. DOI:10.3390/app7060550.

20. Drenckhan W., Hutzler S. Structure and energy of liquid foams // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 224. Pp. 1–16. DOI:10.1016/j.cis.2015.05.004.

21. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1979. 144 с.

22. Yazici S., Mardani-Aghabaglou A. Effect aggregate grain size distribution on properties of permeable of concrete // Journal of Fundamental and

Applied. 2017. Vol. 9. №1. Pp. 323–338. DOI: 10.4314/jfas.v9i1.20.

23. Винокурова О.В., Баранова А.А. Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона // Вестник МГСУ. 2022. Том. 17. №1. С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59.

24. Винокурова О.В., Баранова А.А. О целесообразности использования пластификаторов в производстве теплоизоляционных пенобетонных // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Том 11. №3. С. 432–439. DOI:10.21285/2227-2917-2021-3-432-439.

25. Стольников В.В. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. Л.: Госэнергоиздат, 1953. 168 с.

26. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. 264 с.

27. Sloane N.J.A. The packing of spheres // Scientific American. 1984. Vol. 250. №1. Pp. 116–125. DOI:10.1038/scientificamerican0184-116.

28. Белов В.В., Образцов И.В., Иванов В.К., Коноплев Е.Н. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 108 с.

Информация об авторах

Винокурова Ольга Владимировна, ведущий специалист сектора испытаний общестроительных материалов, отдел испытаний материалов и конструкций. E-mail: neutrino.78@mail.ru. ОАО «Ангарское управление строительства» (ОАО «АУС»). Россия, 665832, Иркутская область, г. Ангарск, микрорайон 7А, дом 35.

Баранова Альбина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство». E-mail: baranova2012aa@mail.ru. Ангарский государственный технический университет (АнГТУ). Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, д. 60.

Поступила 15.06.2022 г.

© Винокурова О.В., Баранова А.А., 2022

***Vinokurova O.V., Baranova A.A.**

Angarsk State Technical University

*E-mail: neutrino.78@mail.ru

ON THE QUESTION OF CHOOSING THE OPTIMAL WATER-CEMENT RATIO IN THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATING FOAM CONCRETE

Abstract. The article considers the influence of the water-cement ratio on the formation of the structure of thermally insulating foam concrete, having the D300 average density grade. The basis for the analysis is the contradiction between the experimentally obtained direct dependence of the strength of foam concrete on the water-cement ratio and the practice of improving the structure of the material due to water reduction. The computation of the optimal amount of water in the foam concrete mixture based on the method of absolute volumes is presented. The calculation includes a formula for determining the volume of the interpore space depending on the thickness of the interpore partition, the cell diameter and the type of packing. The actual indicators collected during the experiment confirm the results of the calculations. The influence of the amount of water in the foam concrete mixture on the quality of the foam concrete is evaluated by the compressive strength and the macrostructure character of the material. The strength is determined by the destructive

method. The structure is studied using an optical microscope in combination with image processing software. The greatest strength is possessed by a material with a partition thickness exceeding the maximum size of the cement grain, provided that the volume of the interpore space and the sum of the absolute volumes of the components of the foam concrete mixture are equal. A structure with closed pores and dense interpore partitions is observed in foam concrete on a protein foam former with a water-cement ratio, taking into account water in the foam, equal to 0.7.

Keywords: water-cement ratio, macrostructure, pore diameter, designing the composition, thermal insulating foam concrete.

REFERENCES

1. Zhao W., Huang J., Su Q., Liu T. Models for Strength Prediction of High-Porosity Cast-In-Situ Foamed Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. No.2. Pp.1–10. DOI:10.1155/2018/3897348
2. Decký M., Drusa M., Zgútová K., Blaško M., Hájek M., and Scherfel W. Foam concrete as new material in road constructions. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 428–433. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.585
3. Fu Y., Wang X., Wang L., Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–25. DOI: 10.1155/2020/6153602
4. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete. *Advances in materials science and engineering*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/9520294
5. Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B., Shakhmov Zh.A. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13
6. Steshenko A.B., Kudryakov A.I. Foam concrete with plasticizing and micro-reinforcing additives. "ALITinform" International Analytical Review. 2018. No. 3(52). Pp. 26–40.
7. Vu K.D., Bazhenova S.I. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10311. DOI: 10.34910/MCE.103.11
8. Abd Elrahman M., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No.7. 1447. DOI:10.3390/app9071447
9. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Barano, A.V., Alaskhanov A.Kh., Svintsov A.P. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Is. 8(100). P. 10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3.
10. Sizov V.P. Design of heavy concrete compositions. [Proektirovanie sostavov tyazhelogo betona]. M.: Strojizdat, 1979. 144 p. (rus).
11. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. Stability and instability of foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2015. Vol. 68. No.11. Pp.1–8. DOI:10.1680/mac.15.00097.
12. Zhao J., Deng Y., Gao P., Lu X., Zhang J., Zong J. Pore Structure, Morphology, and Strength of Self-Compacting Foam Material Backfilled Behind the Underground Pipe-Wall of Yellow River. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 24. P. 5724. DOI:10.3390/ma13245724
13. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Modeling structures of open cell foams. *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 131. Pp.1–30. DOI: 10.1016/j.comatsci. 2017.01.029.
14. Kudryavtsev P.G. Structure of pores in solid porous bodies [Struktura por v tverdykh poristyykh telakh]. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 80–103. DOI:10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103. (rus).
15. Kubala P. Random sequential adsorption of Platonic and Archimedean solids. *Physical Review E*. 2019. Vol. 100. No. 4. 042903. DOI:10.1103/PhysRevE.100.042903.
16. Skibinski J., Cwieka K., Wejrzanowski T., Kurzydowski K. Design of Mechanical Properties of Open-Cell Porous Materials Based on μ CT Study of Commercial Foams. *MATEC Web of Conferences*. 2015. Vol. 30. 03005. DOI: 10.1051/matec-conf/20153003005
17. Jin Y., Yoshino H. A jamming plane of sphere packings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2021. Vol. 118. No. 14. Pp. 1–8. DOI:10.1073/pnas.2021794118
18. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of Pore Structure of Microbial Foam Concrete and Its Influence on Properties. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2021. Vol. 14. No. 3. Pp. 158–166. DOI:10.25103/jestr.143.18
19. Chung S.-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evalu-

ated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 6. 550. DOI:10.3390/app7060550.

20. Drenckhan W., Hutzler S. Structure and energy of liquid foams. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. Vol. 224. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.cis.2015.05.004

21. Sizov V.P. Design of heavy concrete compositions. [Proektirovanie sostavov tyazhelego betona]. M.: Strojizdat, 1979. 144 p. (rus).

22. Yazici S., Mardani-Aghabaglou A. Effect aggregate grain size distribution on properties of permeable of concrete. *Journal of Fundamental and Applied*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 323–338. DOI: 10.4314/jfas.v9i1.20

23. Vinokurova O.V., Baranova A.A. The influence of foams, having different expansion ratios, on the structurization of thermal insulation foam concrete [Vliyanie pen razlichnoj kratnosti na formirovanie struktury teploizolyatsionnogo penobetona]. *Vestnik MGSU*. 2022. Vol. 17. No 1. Pp. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59 (rus).

24. Vinokurova O.V., Baranova A.A. Feasibility of using plasticizers for producing thermal insulation foam concrete [O tselesoobraznosti

ispol'zovaniya plastifikatorov v proizvodstve teploizolyatsionnogo penobetona.]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate [Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost']*. 2021. Vol. 11. No 3. Pp. 432–439. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-432-439. (rus).

25. Stol'nikov V.V. Air-entraining additives in hydrotechnical concrete. [Vozduhovovlekayushchie dobavki v gidrotekhnicheskom betone]. Leningrad.: Gosenergoizdat, 1953. 168 p. (rus).

26. Tihomirov V.K. Foam. Theory and practice of their production and destruction [Peny. Teoriya i praktika ih polucheniya i razrusheniya]. M.: Himiya, 1975. 264 p. (rus).

27. Sloane N.J.A. The packing of spheres. *Scientific American*. 1984. Vol. 250. No. 1. Pp. 116–125. DOI:10.1038/scientificamerican0184-116.

28. Belov V.V., Obratsov I.V., Ivanov V.K., Konoplev E.N. Computer implementation of the solution of scientific, technical and educational problems: a tutorial [Komp'yuternaya realizatsiya resheniya nauchno-tekhnicheskikh i obrazovatel'nykh zadach: uchebnoe posobie.]. Tver: TvGTU. 2015. 108 p. (rus).

Information about the authors

Vinokurova, Olga V. Leading specialist in the testing sector of general construction materials, Materials and Structures Testing Department. E-mail: neutrino.78@mail.ru. Angarsk Management of Construction, JSC. Russia, 665835, Angarsk, microdistrict. 7A, Bld. 35.

Baranova, Albina A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Industrial and Civil Engineering". E-mail: baranova2012aa@mail.ru. Angarsk State Technical University (ASTU). Russia, 665835, Angarsk, Tchaikovsky str. 60.

Received 15.06.2022

Для цитирования:

Винокурова О.В., Баранова А.А. К вопросу выбора оптимального водоцементного отношения при производстве теплоизоляционного пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 19–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29

For citation:

Vinokurova O.V., Baranova A.A. On the question of choosing the optimal water-cement ratio in the production of thermal insulating foam concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 19–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

***Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: ajiyonka@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПНОПОРИСТОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОГО 3D-АДДИТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация. В статье рассмотрено решение актуальной проблемы развития 3D-аддитивных технологий в России путем создания новой модели формирующего устройства и разработки композиционных материалов. Целью данной работы является изучение физических, технологических и тепловых свойств крупнопористого керамзитобетона. Требуемые характеристики определяются стандартными методами и требованиями нормативных документов, включая современные физико-химические методы анализа и широкий спектр современных и оригинальных методов исследования, соответствующих современным научным знаниям. Получены составы крупнопористого керамзитобетона с прочностью на сжатие до 9,2 МПа и водопоглощением до 25 % по массе. Для моделирования поведения исследуемых систем был проведен двухфакторный трехуровневый эксперимент для каждого типа смеси крупнопористого керамзитобетона, который позволил получить уравнения регрессии, характеризующие взаимосвязь переменных параметров с определенными свойствами системы. Выявлено, что на величину средней плотности в наибольшей степени влияет удельный расход вяжущего. В то время как прочность больше всего зависит от В/Ц отношения. Более того, в этом случае количество воды в меньшей степени связано с пористостью самого цементного камня, а в большей – с консистенцией и липкостью получаемого клея, его способностью равномерно покрывать частицы наполнителя. Установлено, что рационально подобранные составы конструкционно-теплоизоляционных КПКБ для внутреннего заполнения трехслойной "печатной" стены, омоноличивания и теплоизоляции обеспечат формирование требуемых технико-эксплуатационных показателей.

Ключевые слова: 3D-аддитивные технологии, многослойный синтез, керамзитобетон, 3D-печать, водопоглощение.

Введение. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных архитектурных форм и видов продукции, становятся неотъемлемой частью строительной индустрии, решающей функциональные, психоэмоциональные и инновационно-технологические задачи [1–2].

В результате систематизации данных возникают новые трансдисциплинарные направления науки: биотехнология, геохимия, геофизика, бионика, в том числе геоника (геомиметика) – научное направление, которое рассматривается как искусство применения знаний неорганического мира для решения новых технологических проблем (рис. 1) [3–8].



Рис. 1. Новые трансдисциплинарные направления наук

Каждая из данных дисциплин, решая поставленные перед ней задачи, стремиться найти идеальный вариант комфортной среды обитания для человека, помогая другой [9–13]. Такой обширный спектр задач порождает новые потоки инновационных идей, благодаря глубокому пониманию их взаимосвязей, поэтому потенциал применения новых эффективных материалов и методов 3D-аддитивного строительства способны стать двигателем развития строительной отрасли.

Несмотря на многие положительные особенности, внедрение 3D-аддитивных технологий в России ещё не достигло значительного уровня. Наиболее распространенным способом печати на данный момент стала контурная печать. Её узким местом является сложность придания конструкции требуемых теплофизических свойств и низкая скорость печати, связанная с большой удельной длиной печатного трека [14].

Существует потребность в создании моделей отечественных формующих устройств для многослойного синтеза и композитов с повышенными технологическими, физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Наиболее эффективным и актуальным подходом к печати стен является послойное формирование многослойной полнотелой конструкции, состоящей из мелкозернистых внешних декоративно-защитных слоёв, и внутреннего конструкционно-теплоизоляционного слоя. В качестве материалов для внутреннего слоя интерес представляют керамзитобетон, пенобетон, неавтоклавный газобетон. Согласно анализу публикаций [15–16], находящихся в открытом доступе, данное направление находится на начальном этапе развития.

В этой связи большой научно-практический интерес представляет исследование крупнопористого керамзитобетона ввиду особенностей его структуры и свойств.

Крупнопористый керамзитобетон (КПКБ) представляет собой беспесчаный легкий бетон, состоящий из керамзитового гравия, скрепленного небольшим количеством цементного камня, который, обволакивая тонким слоем зерна заполнителя, не заполняет пустотность между ними. Повышенные теплотехнические характеристики крупнопористого керамзитобетона обусловлены структурными особенностями, которые характеризуются открытой непрерывной пористостью и зернистым строением, что отличает его от традиционных легких бетонов.

На сегодняшний день в строительной отрасли не существует документов, регламентирующих состав и требования, предъявляемые к характеристикам и качеству КПКБ для 3D-аддитивных технологий. Одной из основных проблем, тормозящих развитие 3D-аддитивного строительства для массового применения, является ограниченность рынка используемых материалов и компонентов, пригодных для многослойной печати. В этой связи целью работы стала разработка эффективных составов крупнопористого керамзитобетона, для изготовления методом печати эффективных трехслойных стеновых элементов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Материалы и методы. В экспериментальных исследованиях при изготовлении бетонов применялись следующие исходные материалы: в качестве вяжущего – композиционные вяжущие с удельной поверхностью 380 и 500 м²/кг, полученное в результате совместного помола отсева дробления кварцитопесчанника Лебединского месторождения (табл. 1) с портландцементом ЦЕМ I 42,5Н (табл. 2); сухая керамзитовая засыпка для сборных полов КНАУФ фракции 0-1,25, суперпластификатор Реламикс ПК, вода.

Таблица 1

Химический состав кварцитопесчанника

Содержание оксидов, масс. %									
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	P ₂ O ₅	S
86,24	0,27	2,39	2,16	1,58	0,89	1,34	0,69	0,11	0,06

Таблица 2

Состав и свойства применяемого портландцемента

Наименование портландцемента изготовителя (маркировка)	Суд., м ² /кг	НГ, %	Сроки схватывания, час:мин		Минералогический состав, %				Прочность через 28 сут, МПа	
			начало	конец	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	R _{изг}	R _{сж}
ЦЕМ I 42,5Н	380	25,0	3:00	4:30	61,4	12,1	6,7	12,0	8,1	58,3

Для изучения и анализа сырьевых компонентов и бетонов на их основе в работе применялись стандартные методики, современные физико-хи-

мические методы анализа и оригинальные методы исследований, соответствующие решаемым задачам.

Был осуществлен двухфакторный трехуровневый эксперимент, в котором варьировался расход вяжущего на 1 см^3 заполнителя (x_1) и В/Ц (x_2). В качестве выходных параметров были приняты средняя плотность, прочность на сжатие и водопоглощение КПКБ.

Для всех образцов периодически осуществлялись: контроль массы (степень увлажнения); скорость прохождения ультразвука (прочность на сжатие в возрасте 7 и 28 суток, наличие глобальных дефектов); осмотр текущего состояния (наличие трещин, сколов).

Динамика водопоглощения и сушки крупнопористого керамзитобетона определялась по ГОСТ 12730.3-78 путём погружения предварительно высушенных образцов ($7 \times 7 \times 7 \text{ мм}$) в емкость, наполненную водой с таким расчетом, чтобы уровень воды был выше верхнего уровня уложенных образцов примерно на 50 мм. Образцы взвешивают через каждые 24 ч водопоглощения. Испытание проводят до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний

будут отличаться не более чем на 0,1 %. Водопоглощение бетона отдельного образца по массе W_m в процентах определяют с погрешностью до 0,1 % по формуле:

$$W_m = \frac{m_c - m_b}{m_c} \cdot 100\%, \quad (1),$$

где m_c – масса высушенного образца, г; m_b – масса водонасыщенного образца, г.

Данная методика позволяет сравнивать материалы одного типа и получить картину строения порового пространства.

Основная часть. Для получения методом 3D-печати эффективных трёхслойных стеновых элементов с повышенными эксплуатационными характеристиками научными сотрудниками кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова зарегистрирован патент на полезную модель РФ №205716 «Формующее устройство для аддитивного изготовления многослойных стеновых конструкций» (рис. 2).

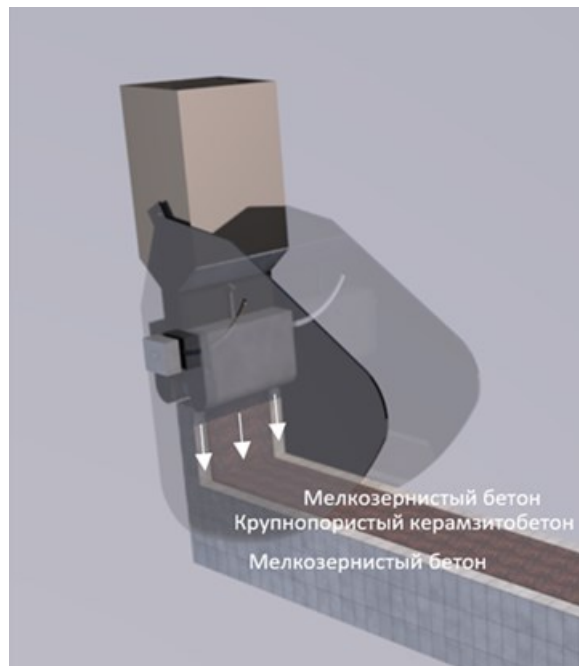
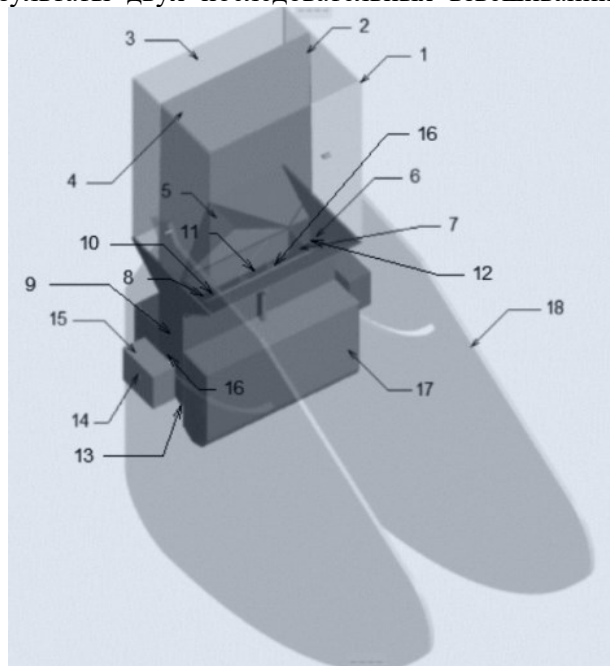


Рис. 2. Формующее устройство для аддитивного изготовления многослойных стеновых конструкций:

- 1 – контейнер для бетонной смеси; 2 – перегородка; 3 и 4 – два отсека; 5 – наклонные пластины;
6, 7 и 8 – независимые выходные отверстия из контейнера; 9 – сопло, разделённое на три канала 10, 11 и 12;
13 – вибровкладыши; 14 – вал; 15 – вибровозбудители; 16 – эластичные втулки; 17 – шибера;
18 – поворотные заглаживающе-поддерживающие щитки (ЗПЩ)

Для совершенствования нового вида трёхслойной 3D-печати с монолитной связью слоев осуществлялся подбор и оптимизация состава крупнопористого керамзитобетона.

Для моделирования поведения изучаемых систем для каждого вида смеси КПКБ был осуществлен двухфакторный трехуровневый эксперимент, который позволил получить уравнения регрессии, характеризующие связь варьируемых

параметров с определёнными свойствами системы (табл. 3–4).

На основании полученных результатов была проведена статистическая обработка данных в Microsoft Excel и составлены математические модели, позволяющие получать составы с заданными прочностными показателями в исследуемом диапазоне дозирования вяжущего и В/Ц.

Уравнение регрессии прочности на сжатие в возрасте 28 суток КПКБ на сжатие:

$$R_{сж}^{28} = 3,94 + 2,84x_1 + 0,8x_2 - 0,31x_1^2 + 0,75x_2^2 + 1,01x_1 \cdot x_2;$$

Уравнение регрессии средней плотности в возрасте 28 суток КПКБ:

$$R_{ср} = 694,67 + 62x_1 + 31,3x_2 + 18,5x_1^2 - 8x_2^2 + 16,25x_1 \cdot x_2;$$

Уравнение регрессии водопоглощения КПКБ:

$$R^{вод} = 15,95 - 3x_1 + 0,14x_2 + 1,53x_1^2 + 2,39x_2^2 - 0,73x_1 \cdot x_2;$$

Таблица 3

Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Расход цемента, г/см ³	x_1	0,25	0,4	0,55	0,15
В/Ц	x_2	0,45	0,55	0,65	0,1

Таблица 4

Матрица планирования эксперимента

Точки плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействие факторов	Прочность на сжатие $R_{сж}^{28}$ сут., МПа (воздушное хранение)	Средняя плотность $\rho_{ср}$, г/см ³
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	Y_1	Y_2
1	1	1	1	1	1	9,2	820
2	1	-1	1	1	-1	7,14	747
3	-1	1	1	1	-1	0,51	645
4	-1	-1	1	1	1	2,5	637
5	1	0	1	0	0	4,56	743
6	-1	0	1	0	0	0,87	655
7	0	1	0	1	0	6,14	726
8	0	-1	0	1	0	1,41	619
9	0	0	0	0	0	5,77	723

На основании данных уравнений были составлены номограммы (рис. 3), визуально отображающие зависимость прочности, плотности, водопоглощения от принятых переменных параметров.

Как видно из графиков, на величину средней плотности в наибольшей степени влияет удельный расход вяжущего. В то время как прочность в наибольшей степени зависит от В/Ц отношения. Причём в данном случае количество воды в меньшей степени связано с пористостью самого цементного камня, а в большей степени с консистенцией и липкостью получаемого клея, его способностью равномерно покрывать частицы заполнителя.

В результате были получены составы со средней плотностью около 700 кг/м³, с прочностью на сжатие 6...7 МПа. Кроме того, существует возможность повышения прочности на сжатие до 9,2 МПа, за счёт увеличения средней плотности. Бетон, обладающий такими физико-

механическими характеристиками, может быть использован для трехслойного 3D-аддитивного строительства. Состав 2, ввиду недостаточного количества цементного клея, разрушился.

Основные физико-механические характеристики бетонов на пористых заполнителях зависят от: 1) совокупности химических элементов, составляющих вещество; 2) структурных особенностей в результате затвердевания бетонной смеси и последующего твердения бетона. На формирование макро- и микроструктуры крупнопористого керамзитобетона существенную роль оказывает технология приготовления бетонной смеси, а также последующая ее интенсификация твердения. При изучении динамики водонасыщения и сушки материалов можно получить информацию о характере распределения пор и особенностях физического взаимодействия материалов с водой. Динамика водопоглощения определялась путём полного погружения предварительно высушенных образцов КПКБ в воду с периодическим взвешиванием (рис. 4).

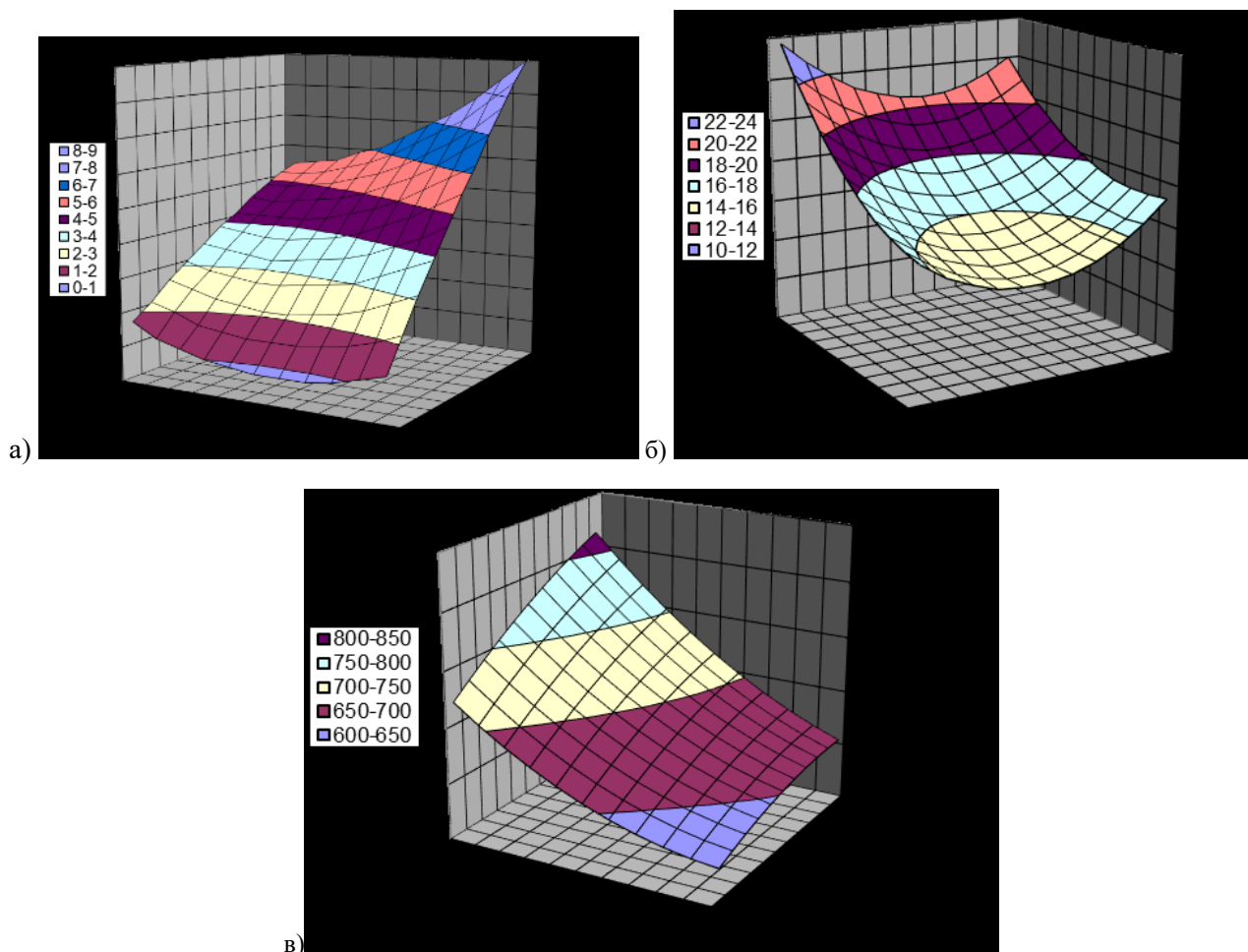


Рис. 3. Номограммы влияния варьируемых факторов на:
а) прочность при сжатии в возрасте 28 суток;
б) водопоглощение в первый час испытаний; в) средняя плотность

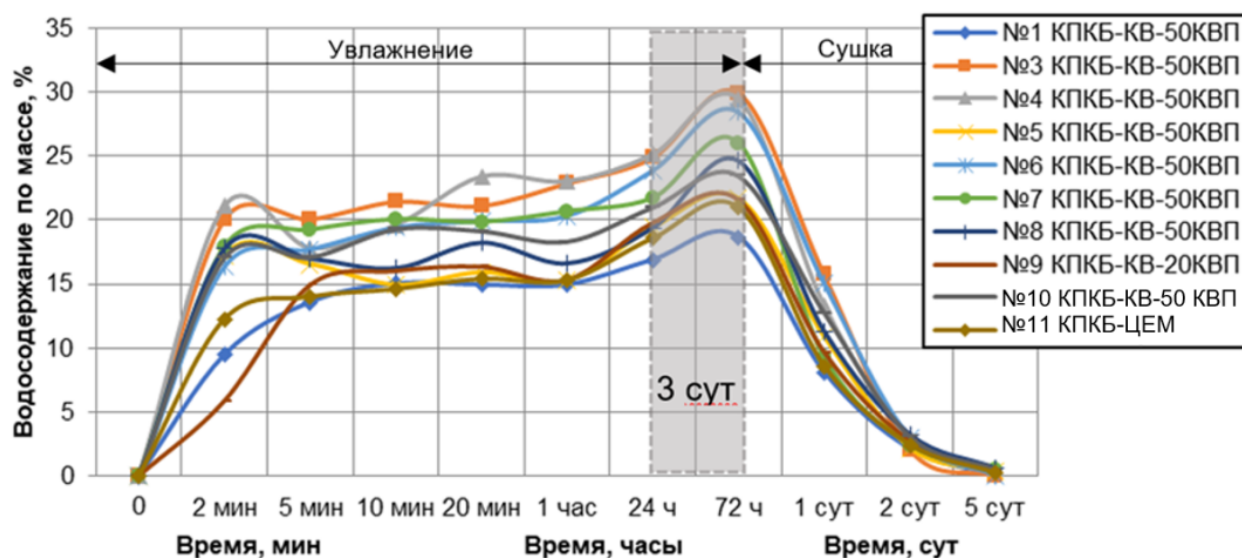


Рис. 4. Динамика водонасыщения и высыхания материалов (№1-№8, №10 КПКБ-КВ-50КВП – составы с применением композиционного вяжущего с содержанием клинкерной части 50 % и различным В/Ц отношением; №9 КПКБ-КВ-20КВП – состав на композиционном вяжущем с содержанием клинкерной части 20%; №11 КПКБ-ЦЕМ – состав с применением портландцемента ЦЕМ I 42,5Н в качестве вяжущего)

Как видно из таблицы, наименьшим водопоглощением через 1 час обладают составы 1, 5 и 9. Наилучший результат обусловлен уменьшением

макро- и микропористости бетона. В них обмазка зёрен заполнителя равномерная, а сам цементный камень наиболее плотный. Эти же составы имеют

наилучшие показатели прочности. Таким образом, по совокупности показателей, в том числе наименьшему расходу вяжущего для печати внутреннего слоя стен оптимальным является состав № 9.

Рационально подобранные композиции конструкционно-теплоизоляционные КПКБ для внутреннего заполнения трехслойной «напечатанной» стены, омоноличивания и теплоизоляции обеспечат формирование требуемых технико-эксплуатационных показателей. Рассмотрен вопрос возможного применения разработанного крупнопористого керамзитобетона в сочетании с мелкозернистым бетоном. Целью расчета было определить ориентировочную толщину трехслойной наружной стены в условиях города Белгорода, в которой крайние слои из мелкозернистого бетона выполняли защитно-декоративную, а средний слой из крупнопористого керамзитобетона – теплоизоляционно-конструкционную. Расчеты проводились в соответствии с СП 50.13330.2012 и СП 131.13330.2020 для жилого здания. Расчетная температура внутреннего воздуха принималась равной 20 °С для жилых зданий. Толщина крайних стенок принималась 30 мм. Расчеты показали, что необходимая толщина крупнопористого керамзитобетона для соблюдения требований по теплопередаче для Белгородского региона должна быть не менее 400–500 мм, а в целом толщина конструкции составляет 500–550 мм.

Выводы. Разработка составов строительных композитов, а также организация их массового производства для трехслойного 3D-аддитивного строительства зданий и сооружений позволит повысить психологический комфорт человека, обеспечит строительную отрасль промышленности изделиями сложной формы, с высокими эксплуатационными характеристиками, многократно сократит сроки строительства.

Серьёзной проблемой, тормозящей развитие технологии аддитивного строительства, является ограниченность рынка используемых компонентов и материалов. Одним из путей повышения эффективности технологии строительной печати стен и сборных элементов стен, при заводском способе организации производства, является переход от контурной печати к печати полнотелых многослойных конструкций. При этом в качестве материалов предлагается использование мелкозернистых бетонов в качестве защитно-декоративных внешних слоёв стен и перегородок, и крупнопористых керамзитобетонов для их внутреннего заполнения, омоноличивания и теплоизоляции. В процессе печати, наиболее объёмный внутренний слой из жёсткой крупнопористой керамзитобетонной смеси, формируемый за

счёт гравитационных сил и вибрационной подачи, будет выполнять поддерживающую функцию по отношению к пластичным внешним слоям их мелкозернистого бетона.

Разработанные составы крупнопористого керамзитобетона, обеспечивающие предел прочности при сжатии до 9,2 МПа, водопоглощением до 25 % по массе позволяют:

- обеспечить строительную отрасль промышленности изделиями сложной формы, с высокими эксплуатационными характеристиками;
- снизить себестоимость изготовления изделий сложной формы за счет отказа от дорогостоящих операций механической обработки.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Compos. Part B Eng. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
2. Vatin N.I., Usanova K.Y. BIM end-to-end training: From school to graduate school // Adv. Trends Eng. Sci. Technol. III-Proc. 3rd Int. Conf. Eng. Sci. Technol. ESaT 2018. 2019. Pp. 651–656. DOI:10.1201/9780429021596-102
3. Lesovik V. Geonics. Subject and tasks. Belgorod: Publishing House of V.G. Shukhov BSTU. 2012. 213 p.
4. Казлитина О.В., Мартынова К.Ю., Адонин С.В., Лазарев П.И., Моторыкин Д.А., Антонюк Р. Геоника. Геомиметика как наука о разработке и применении эффективных композитов для монолитного строительства // Научные технологии и инновации. 2019. С. 221–224.
5. Бычкова А.А. Отображение синергетики в архитектурной геонике (Геомиметике) // Экономика. Общество. Человек. 2019. С. 57–61.
6. Цветкова Ю.П. Геоника как новое стилестическое направление в архитектуре // Фундаментальные основы строительного материаловедения. 2017. С. 1260–1265.
7. Немцева А.В., Пономарёва М.М. Архитектурная геоника в современных творческих концепциях // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. 2019. С. 34–38.
8. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и

поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Научный рецензируемый журнал «Вестник СиБАДИ». 2021. Том 18 (1). С. 120–134.

9. Першина И.Л. Архитектурная геоника: новые подходы к архитектурному поиску комфортной среды обитания // Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ. 2018. С. 430–431.

10. Елистраткин М.Ю., Шапиро А.Э., Милькина А.С., Лесовик Г.А., Агеева М.С. Геоника. Геомиметика как основополагающее направление для развития строительной индустрии // Наукоемкие технологии и инновации. 2019. С. 125–129.

11. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). Сер. «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». 2019. Pp. 344–347. DOI:10.1007/978-3-030-22974-0_83

12. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties // Journal of southwest jiaotong university. 2020. Vol. 55. No. 3. DOI:10.35741/issn.0258-2724.55.3.14

13. Pershina I.L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. DOI:10.1088/1757-899X/687/5/0550

14. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чернышева Н.В. Современные трехмерные технологии и факторы сдерживающие их // Вестник БГТУ В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 22–30.

15. Markin V., Nerella V.N., Schröfl C., Gusynova G., Mechtcherine V. Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication // Materials (Basel). 2019. Vol. 12(15). 2433. DOI:10.3390/ma12152433

16. Глаголев Е.С., Ермолаева А.Э., Елистраткин М.Ю. Использование ячеистых бетонов

в 3d-аддитивной индустрии // Теоретические основы создания эффективных композитов. Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. 2018. С. 75–82.

17. Wolfs R., Bos F., Salet T. Early age mechanical behaviour of 3D-printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103–116.

18. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299.

19. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F.R. 3D Concrete printing: machine and mix design // International Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 6. No. 6. Pp. 14–22.

20. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

21. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: a review // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. 106037. DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106037

22. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders // Materials & Design. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109.

23. Wolfs R.J.M., Salet T.A.M. An optimization strategy for 3D concrete printing // In Proceedings of the 22nd EG-ICE workshop 2015. 2015. Pp. 1–5.

24. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347–366.

Информация об авторах

Шермет Алена Анатольевна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, старший преподаватель кафедры дизайна архитектурной среды. E-mail: ajiyonka@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Елистраткин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шермет Евгений Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: 66910@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаталова Светлана Вячеславовна, ассистент, ведущий инженер кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.07.2022 г.

© Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В., 2022

***Sheremet A.A., Elistratkin M.Yu., Sheremet E.O., Lesovik V.S., Shatalova S.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF COARSE-PORED EXPANDED CLAY CONCRETE FOR THREE-LAYER 3D ADDITIVE CONSTRUCTION

Abstract. *The article considers the solution of the urgent problem of the development of 3D additive technologies in Russia by creating a new model of the forming device and the development of composite materials. The purpose of this work is to study the physical, technological and thermal properties of coarse-pored expanded clay concrete. The required characteristics are determined by standard methods and requirements of regulatory documents, including modern physico-chemical methods of analysis and a wide range of modern and original research methods corresponding to modern scientific knowledge. Compositions of coarse-porous expanded clay concrete with compressive strength up to 9.2 MPa and water absorption up to 25% by weight were obtained. To simulate the behavior of the studied systems, a two-factor three-level experiment was conducted for each type of mixture of coarse-pored expanded clay concrete, which allowed us to obtain regression equations characterizing the relationship of variable parameters with certain properties of the system. It was revealed that the value of the average density is most affected by the specific consumption of the binder. While the strength depends most on the I/C ratio. Moreover, in this case, the amount of water is less related to the porosity of the cement stone itself, and more to the consistency and stickiness of the resulting glue, its ability to evenly cover filler particles. It is established that rationally selected compositions of structural and thermal insulation KPKB for the internal filling of a three-layer "printed" wall, homologation and thermal insulation will ensure the formation of the required technical and operational indicators.*

Keywords: *3D additive technologies, multilayer synthesis, expanded clay concrete, 3D printing, water absorption.*

REFERENCES

1. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
2. Vatin N.I., Usanova K.Y. BIM end-to-end training: From school to graduate school. *Adv. Trends Eng. Sci. Technol. III-Proc. 3rd Int. Conf. Eng. Sci. Technol. ESaT 2018.* 2019. Pp. 651–656. DOI:10.1201/9780429021596-102
3. Lesovik V. Geonics. Subject and tasks. Belgorod: Publishing House of V. G. Shukhov BSTU. 2012. 213 p.
4. Kozlitina O.V., Martynova K.Yu., Adonin S.V., Lazarev P.I., Motorykin D.A., Antonyuk R. Geonics. Geomimetics as the science of the development and application of effective composites for monolithic construction [Geonika. Geomimetika kak nauka o razrabotke i primenenii effektivnykh kompozitov dlya monolitnogo stroitel'stva]. High-tech technologies and innovations. 2019. Pp. 221–224. (rus)
5. Bychkova A.A. Mapping of synergetics in architectural geonics (Geomimetics) [Otobazhenie sinergetiki v arhitekturnoj geonike (Geomimetike)]. *Economy. Society. Human.* 2019. Pp. 57–61. (rus)
6. Tsvetkova Yu.P. Geonics as a new stylistic direction in architecture [Geonika kak novoe stilisticheskoe napravlenie v arhitekture]. *Fundamentals of building materials science.* 2017. Pp. 1260–1265. (rus)
7. Nemtseva A.V., Ponomareva M.M. Architectural geonics in modern creative concepts [Arhitekturnaya geonika v sovremennykh tvorcheskikh koncepciyah]. *Nature-like technologies of building composites for the protection of human habitat.* 2019. Pp. 34–38. (rus)
8. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in building materials science [Geonika (geomimetika) i poisk optimal'nyh

reshenij v stroitel'nom materialovedenii]. Scientific peer-reviewed journal "Bulletin of SibADI". 2021. Vol. 18. No. 1. Pp. 120–134. (rus)

9. Pershina I.L. Architectural bionics: new approaches to the architectural search for a comfortable living environment [Arhitekturnaya geonika: novye podhody k arhitekturnomu poisku komfortnoj sredy obitaniya]. Science, education and experimental design in MARKHI. 2018. Pp. 430–431. (rus)

10. Elistratkin M.Yu., Shapiro A.E., Milkina A.S., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Geonics. Geomimetics as a fundamental direction for the development of the construction industry [Geonika. Geomimetika kak osnovopolagayushchee napravlenie dlya razvitiya stroitel'noj industrii]. High-tech technologies and innovations. 2019. Pp. 125–129. (rus)

11. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». 2019. Pp. 344–347. DOI:10.1007/978-3-030-22974-0_83. (rus)

12. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. Journal of southwest jiaotong university. 2020. Vol. 55. No. 3. DOI:10.35741/issn.0258-2724.55.3.14

13. Pershina I.L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. DOI:10.1088/1757-899X/687/5/0550

14. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Chernysheva N.V. Modern three-dimensional technologies and factors constraining them [Sovremennye trekhmernye tekhnologii i faktory sderzhivayushchie ih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 22–30. (rus)

15. Markin V., Nerella V.N., Schröfl C., Gusynova G., Mechtcherine V. Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication. Materials (Basel). 2019. Vol. 12(15). 2433. DOI:10.3390/ma12152433

16. Glagolev E.S., Ermolaeva A.E., Elistratkin M.Yu. The use of cellular concrete in the 3d-additive industry [Ispol'zovanie yacheistyh betonov v 3d-additivnoj industrii]. Theoretical foundations for the creation of effective composites. Collection of materials of the Russian online conference dedicated to the Day of Science. 2018. Pp. 75–82. (rus)

17. Wolfs R., Bos F., Salet T. Early age mechanical behaviour of 3D-printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. Pp. 103–116.

18. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. Procedia Engineering. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299.

19. Malaeb Z., Hachem H.A., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F.R. 3D Concrete printing: machine and mix design. International Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 6. No. 6. Pp. 14–22.

20. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

21. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: a review. Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. 106037. DOI:10.1016/j.cemconres.2020.106037

22. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. Materials & Design. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109.

23. Wolfs R.J.M., Salet T.A.M. An optimization strategy for 3D concrete printing. In Proceedings of the 22nd EG-ICE workshop 2015. 2015. Pp. 1–5.

24. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347–366.

Information about the authors

Sheremet, Alyona A. Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Senior Lecturer of the Department of Architectural Environment Design. E-mail: ajiyonka@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Elistratkin, Mikhail Yu. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Sheremet, Evgeny O. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: 66910@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Lesovik, Valery S. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Shatalova, Svetlana V. Assistant, Leading Engineer of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 27.07.2022

Для цитирования:

Шеремет А.А., Елистраткин М.Ю., Шеремет Е.О., Лесовик В.С., Шаталова С.В. Исследование физико-механических свойств крупнопористого керамзитобетона для трехслойного 3d-аддитивного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

For citation:

Sheremet A.A., Elistratkin M.Yu., Sheremet E.O., Lesovik V.S., Shatalova S.V. Investigation of physico-mechanical properties of coarse-pored expanded clay concrete for three-layer 3D additive construction. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48

¹Меркулов С.И., ²Есипов С.М., ²Каишуба С.О.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Аннотация. В доступных для исследования и анализа источниках, в том числе и действующих нормативных документах, крайне сжато рассматриваются методики расчета усиленных внешних армированием элементов при работе на кручение. В данной статье рассмотрен ряд существующих апробированных методик расчета железобетонных изгибаемых элементов с внешним композитным армированием, в том числе при работе с кручением. Описана необходимость введения в существующие расчетные зависимости предпосылок обоснования поведения железобетонных изгибаемых элементов, в том числе с внешним композитным армированием, при работе в сложном напряженно-деформированном состоянии. Рассмотрены случаи возникновения дополнительных крутящих усилий в условиях классических вариантов нагрузок и воздействий на элемент. Предположено описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением. Приведены основные положения работы железобетонных конструкций при изгибе с кручением. Приведены основные предельные состояния, а также сделаны предположения о возможном наличии дополнительных предельных состояний железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами. Предложен вариант условия пропорциональности продольных относительных деформаций для железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением.

Ключевые слова: железобетонные конструкции с внешним композитным армированием, сопротивление кручению с изгибом, расчет на прочность, сложное напряженно-деформированное состояние, пространственная трещина.

Введение. В современной практике строительства все чаще встречаются сложные очертания строительных конструкций, требующие особого подхода к проектированию и конструированию. Для достижения всех требований безопасной эксплуатации зданий и сооружений, при экономической обоснованности и эффективности, необходимо применение самых современных методик проектирования.

Для реализации различных конструктивных особенностей сложных очертаний, целесообразно применение железобетона, а внешнее композитное армирование, получающее в последнее время широкую популярность, будет способствовать увеличению несущей способности строительного элемента, при экономии бетона и арматурной стали.

При работе конструкций на простой изгиб, может произойти ряд ситуаций: появление случайных эксцентриситетов приложения нагрузки, асимметрия несущего сечения, неоднородность конструкции, неравномерная осадка здания или сооружения. Данные ситуации заставляют конструкции дополнительно воспринимать усилие кручения, вызывая в изгибаемых элементах сложно-деформированное состояние – кручение с изгибом.

Кроме случайных факторов, строительные конструкции первоначально могут работать на

кручение с изгибом, например, балки с боковыми консолями, краевые балки, наклонные арки и другие. При эксплуатации зданий и сооружений, в случае недооцененности влияния кручения, на несущую способность сечения при изгибе, может произойти обрушение строительных конструкций.

Материалы и методы. Работа железобетонных конструкций при совместном воздействии изгибающего момента и кручении является достаточно полно изученной отраслью современной строительной науки. За последние несколько лет ряд проведенных исследований [1-5] способствовали актуализации накопленных знаний по данному вопросу и появлению пособия по расчету железобетонных элементов, работающих на кручение с изгибом, выпущенному Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в 2020 году.

В соответствии с методикой расчета, изложенной в пособии, прочность стержневых железобетонных конструкций с прямоугольным поперечным и продольным сечениями при совместном действии изгибающих и крутящих моментов производится на основании модели пространственных расчетных сечений.

Предложено считать, что при одновременном действии в одном элементарном сечении изгибающих и крутящих моментов, по достижении

исчерпанию несущей способности на трещиностойкость, в железобетонном элементе возникает пространственная спиральная трещина, расположенная в пределах трех граней элемента. При этом в замыкающей четвертой грани появляется условная линия раздела сжатой и растянутой зон, которые в совокупности образуют пространственное сечение сложной формы. Если принять

a

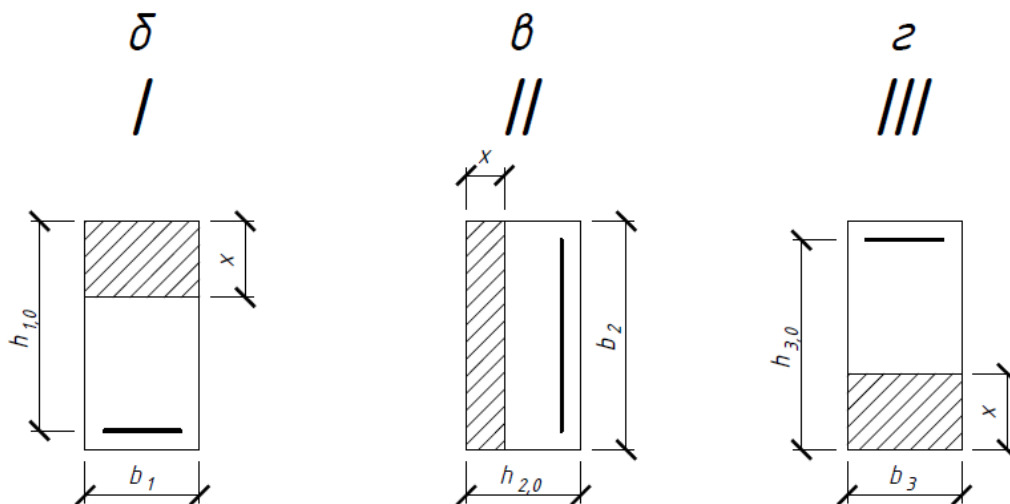
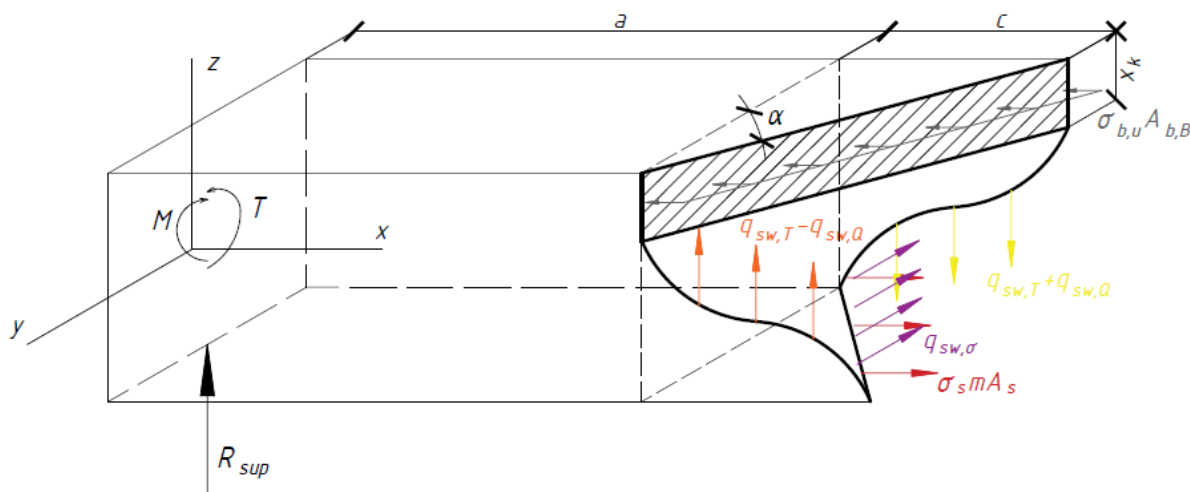


Рис. 1. Усилия в пространственном сечении (a) и схемы (I, II, III) расположения сжатой зоны (б – г) в железобетонном элементе при изгибе с кручением

В качестве внешних усилий в расчете необходимо использовать: для схемы I – крутящий (Т) и изгибающий (М) моменты; для схемы II – крутящий момент (Т) и дополнительный изгибающий момент (М), возникающий от действия поперечной силы (Q), которая действует по оси сечения расположенной в центре тяжести сжатой зоны, принимается приближенно $Q \cdot h/2$; для схемы III – крутящий момент (Т) и изгибающий момент (М). Однако, в этом случае, изгибающий момент меняет знак вследствие поворота сече-

данную теорию, то может существовать три схемы расположения сжатой зоны (рис. 1 б–г): у верхней грани элемента, сжатой от изгиба (схема I), у боковой грани элемента, параллельной плоскости изгиба (схема II), у нижней грани элемента, растянутой от изгиба (схема III).

Для всех схем, крутящий момент (Т) определяется как равнодействующий момент, возникающий от действия поперечной нагрузки на плечо, равное половине ширины сечения, по оси сечения, расположенного в центре тяжести.

При расчете усилий в статически неопределимых элементах, дополнительно работающих с кручением, крутильный момент инерции сечения этого элемента определяется как для упругого тела, при использовании справочных данных, методов сопротивления материалов или теории упругости. Для сечений, которые имеют дефекты

в виде трещин, учитывается только неповрежденная часть бетона и арматура.

Для вычисления предельного момента от работы внешних сил учитываются все (постоянные + длительные + кратковременные) нагрузки, точки приложения которых приходятся с одной стороны от координат положения расчетного пространственного сечения. При учете нагрузок, действующих по длине элемента в зоне пространственного сечения, используется следующее правило: расчетный крутящий момент (T), изгибающий момент (M) и поперечная сила (Q) вычисляются в поперечном сечении, проходящем через центр тяжести сжатой зоны пространственного сечения.

По причине различного расположения сжатой зоны бетона при расчете по различным схемам разрушения, в общем случае обозначения дополняются индексом (i) ($i = 1, 2, 3$, см. рис. 1) и для конкретных схем разрушения им присваиваются соответствующие номера. В расчет принимаются нормальные и касательные напряжения в бетоне сжатой зоны.

Проведенными экспериментальными исследованиями [1–5] было установлено, что угол наклона спиральной пространственной трещины к продольной оси изогнутого элемента всегда превышает 45° , поэтому длина проекции пространственного сечения (c) при аналитическом обосновании любой из представленных ниже схем разрушения, в первом приближении принимается равной $2 \cdot h + b$, после чего результат уточняется итерационно. В общем случае, рекомендовано производить не менее 4-х расчетов при условии прямоугольной формы сечения, при разных положениях относительно граней элемента пространственного сечения и выбрать в качестве ведущего расчет, предполагающий наименьшую предельно допустимую нагрузку. Почти всегда, после 3–4 итераций, координаты точек начала и окончания расположения расчетного сечения становится очевидным.

В расчетные условия принимается продольная и поперечная (при наличии) арматура с заданными расчетными сопротивлениями и модулями упругости 1-го и 2-го рода. Однако, при случае переармирования, напряжения в продольной арматуре могут не успеть достичь предела текучести, в то время как бетон сжатой зоны потеряет прочность по пространственной форме. Противоположная ситуация имеет место быть при недостаточном проценте армирования, то есть при большом количестве поперечной арматуры в сравнении с расчетной продольной, что, однако, не характерно для изгибаемых элементов стержневого типа. Такая ситуация может наблю-

даться при проектировании железобетонных балок-стенок. В итоге, в общем случае напряжения в арматуре могут не достичь собственного предела текучести в момент времени, когда бетон сжатой зоны потерял прочность в пространственном сечении. Поэтому, в качестве критерия несущей способности целесообразно принять достижение бетоном своих предельных деформаций в пространственной трещине.

Основная часть. Совместное действие железобетонного элемента с внешним композитным армированием при изгибе детально рассмотрено в [6–20].

Автор отмечает, что железобетонный элемент с внешним армированием композитными материалами представляет собой конструкцию, учитывающую работу трех отличных друг от друга материалов: бетон, стальная внутренняя арматура и композитное внешнее армирование. При этом должен быть учтен такой важный параметр, как критическое касательное напряжение в клеевом шве внешнего армирования. Этим фактором определяется и ряд специфических вопросов расчета таких конструкций, а именно: обеспечение прочности контактной зоны; учёт ползучести и усадки бетона.

Выделяются следующие предельные состояния изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами:

- разрыв внешней арматуры при достижении стальной арматуры предела текучести без разрушения сжатой зоны бетона;
- разрушение бетона сжатой зоны при уровне напряжений во внешней арматуре ниже расчетных (случай переармированных элементов);
- разрушение бетона сжатой зоны при совместном достижении стальной арматуры предела текучести и пластических деформаций в зоне контакта композитное внешнее армирование – бетон;
- отслоение элементов из композитных материалов.

В общем случае, введение в расчет на изгиб с кручением железобетонного элемента композитного армирования повлечет за собой увеличение компонентов внутренних сил. В стадии упругой работы сопротивление внешнего композитного армирования будет разделяться на две составляющие: продольное, которое зависит от площади сечения композитного армирования и его расчетного сопротивления; поперечное, которое является следствием возникновения пространственного сечения, зависит от площади сечения композитного армирования, его расчетного сопротивления и угла наклона спиральной трещины.

Таким образом, можно предположить, что при расчете на прочность железобетонного элемента с внешним композитным армированием на изгиб с кручением, необходимо в расчетные уравнения добавить слагаемые, которые будут характеризовать положение, площадь сечения и прочность внешнего композитного армирования.

На рис. 2 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы I расположения сжатой зоны. При данной схеме

сжатая зона расположена в верхней части сечения, композитное армирование под растяжением, таким образом, оно будет оказывать влияние на сумму изгибающих моментов в нормальном и пространственном сечении, а также на сумму усилий вдоль оси X в нормальном и пространственном сечении. В работе будет участвовать вся площадь сечения композитного армирования, для нормального сечения, а для пространственного сечения необходимо учитывать всю площадь среза, которая проходит под углом α к боковой грани элемента.

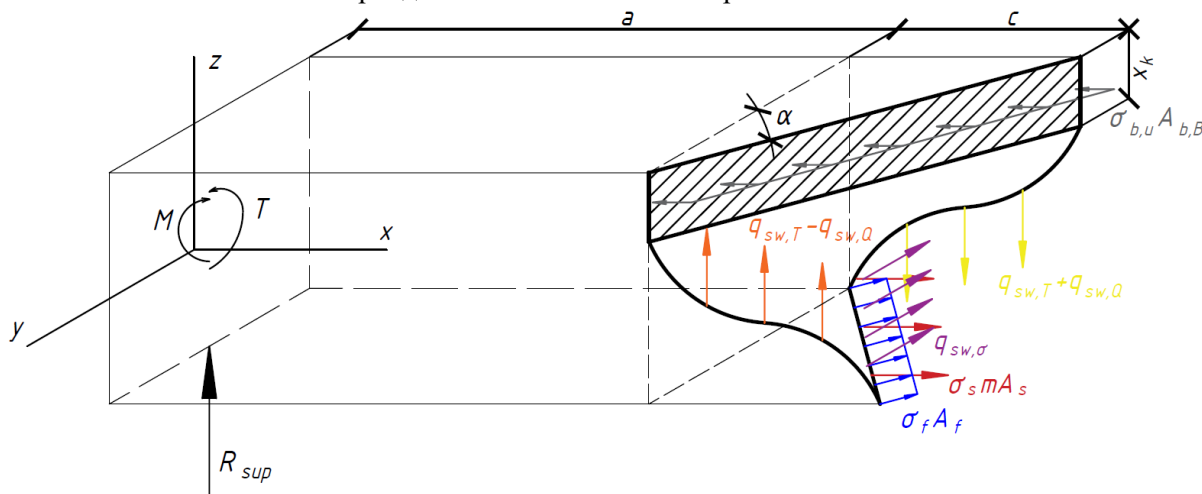


Рис. 2. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы I расположения сжатой зоны

На рис. 3 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы II расположения сжатой зоны. При данной схеме сжатая зона расположена в боковой части сечения, композитное армирование частично под растяжением, таким образом, оно будет оказывать влияние на сумму изгибающих моментов в нормальном и пространственном сечении, а также на

сумму усилий вдоль оси X в нормальном и пространственном сечении. В работе будет участвовать площадь растянутой части сечения композитного армирования, для нормального сечения, для пространственного сечения будет учитываться площадь среза растянутой части сечения, которая проходит под углом α к боковой грани элемента.

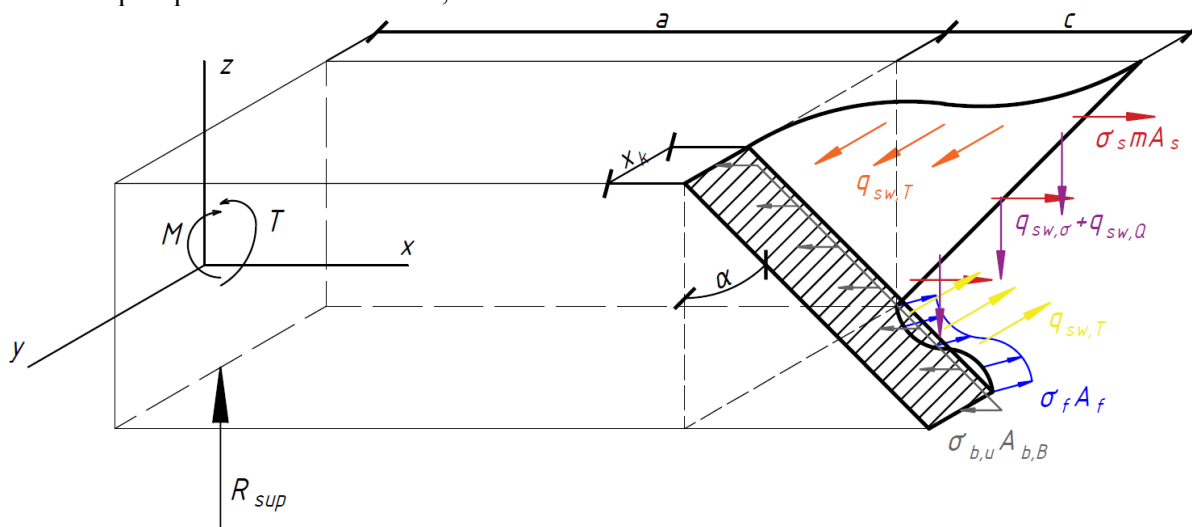


Рис. 3. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы II расположения сжатой зоны

На рис. 4 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы III расположения сжатой зоны. При данной схеме

сжатая зона расположена в нижней части сечения, композитное армирование полностью под сжатием, таким образом, оно не будет оказывать влияние на работу такого элемента.

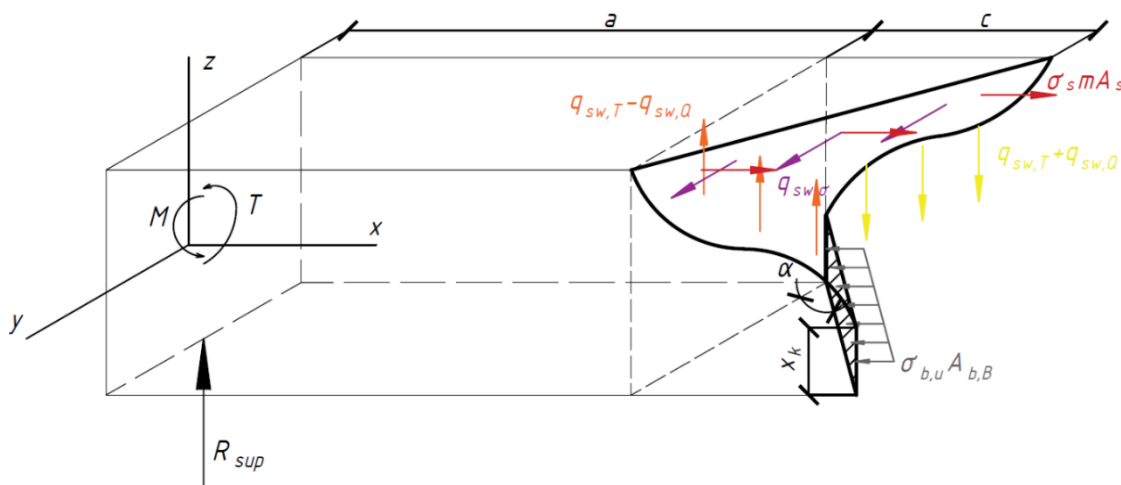


Рис. 4. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы III расположения сжатой зоны

Также, для возможности совместной работы всех компонентов, при условии достижения стадии разрушения всех материалов одновременно, необходимо соблюсти условие пропорциональности продольных деформаций. Без учета внешнего композитного армирования, оно будет иметь вид:

$$\frac{\sigma_{s,l}}{E_s(\lambda) \cdot (h_{1,0} - x)} = \frac{\sigma_{bl,u}}{E_b(\lambda) \cdot x}. \quad (1)$$

А при добавлении внешнего композитного армирования, примет следующий:

$$\frac{\sigma_{s,l}}{E_s(\lambda) \cdot (h_{1,0} - x)} + \frac{\sigma_{f,l}}{E_f(\lambda) \cdot (h - x + 0.5 \cdot h_f)} = \frac{\sigma_{bl,u}}{E_b(\lambda) \cdot x}. \quad (2)$$

Однако, при введении в расчет композитного армирования, соблюдения условия пропорциональности продольных деформаций недостаточно. Композитное армирование может выйти из расчета при отслоении его элементов или потере прочности зоны контакта композитное внешнее армирование – бетон. В таком случае, одним из факторов, определяющих несущую способность усиленного элемента, будет являться достижение касательного напряжения в клеевом шве критического значения, которое можно приближенно описать формулой:

$$\tau_{f,cr} = \frac{\alpha \cdot T_{x,max}}{\beta \cdot h' \cdot b'^2}, \quad (3)$$

где α и β – коэффициенты, зависящие от соотношения приведенной высоты сечения к приведенной ширине, то есть с учетом введенного в расчет внешнего армирования;

$T_{x,max}$ – максимальный крутящий момент в сечении;

h' – приведенная высота сечения;

b' – приведенная ширина сечения.

Основным вопросом, требующим исследования, является уточнение коэффициентов, входящих в формулу (3), с учетом наличия высоко модульного материала по одной из граней. Очевидно, что величины коэффициентов будут меняться по сравнению с классическими величинами, используемыми в строительной механике и сопротивлении материалов. Также, при увеличении деформации, то есть при увеличении ширины раскрытия пространственных трещин нет точного понимания о характере работы композитного внешнего армирования. Это означает, что после наступления в сечении крутящего момента, большего, чем предельный момент трещинообразования при кручении, коэффициенты, входящие в формулу (3), изменятся. Авторы считают, что для уточнения коэффициентов следует принимать уравнения работ всех сил в сечении на виртуальных перемещениях, предложенных А.А. Гвоздевым с введением в них поправочного коэффициента, определенного на основании изменения коэффициента армирования после включения в работу композитного внешнего армирования. Железобетонная конструкция с трещинами в

осях, совпадающих с направлением стержней рабочей арматуры (случай ортотропного армирования), работает как анизотропный материал в общем случае анизотропии. При этом анизотропия зависит от угла наклона трещин к направлениям арматуры. В общем случае, данный угол одинаков при использовании однонаправленных элементов внешнего армирования и усилении растянутых зон по направлению продольных осей. Это приводит к дополнительному теоретическому выводу, что при образовании пространственной трещины спиралевидной формы, в элементарных площадках внешнего армирования будут возникать дополнительные напряжения, которые однонаправленные волокна не в силах воспринять. Это означает необходимость разработки методики определения углов пространственных трещин для всех случаев изгиба с кручением. Полученные углы будет рекомендовано использовать при размещении элементов усиления и их поворота относительно продольной оси усиливаемого элемента.

Выводы. При всей проработанности тем работы железобетонных конструкций при действии изгиба с кручением и внешнего композитного армирования, нет общего понимания о поведении железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при действии изгиба с кручением.

Композитное армирование несомненно увеличит несущую способность конструкции в целом для упругой стадии работы элемента. Достаточно просто определить все параметры напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции на этапе упругой работы, но нет точного понимания о поведении таких конструкций в упругопластической стадии работы, что требует дальнейших научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4(72). С. 17–26.
2. Колчунов В.И., Сальников А.С. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 6(68). С. 22–28.
3. Демьянов А.И., Покусаев А.А., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 5(73). С. 5–14.
4. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных

исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 5(79). С. 13–23.

5. Сальников А.С., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 35–40.

6. Меркулов С.И., Есипов С.М. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 93–97.

7. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 2(35). С. 93–100. DOI: 10.5281/zenodo.1286034

8. Есипов С.М., Есипова Д.В. Критерии совместности работы композитного внешнего армирования и железобетонной конструкции при силовых воздействиях // *Международный студенческий строительный форум - 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) : Сборник докладов*. В 2-х томах, Белгород, 26 ноября 2018 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 64–69.

9. Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции с неметаллической композитной арматурой // *Безопасность строительного фонда России проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 года*. Курск: Курский государственный университет, 2019. С. 218–226.

10. Кузнецова М.С., Попова М.В. Особенности расчета железобетонных изгибаемых элементов, усиленных композитными материалами // *Дни науки студентов ИАСЭ - 2021 : Материалы научно-практической конференции, Владимир, 22 марта – 09 2021 года*. Владимир: Владимирский государственный университет, 2021. С. 178–181.

11. Гаврилова Е.О. Усиление изгибаемых элементов композиционными материалами // *Академическая публицистика*. 2021. № 8-2. С. 111–119.

12. Волик А.Р., Новицкий Я.Я. Экспериментальные исследования железобетонных балок с внешним армированием растянутой грани композитными тканями // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. 2022. Т. 12. № 1. С. 117–125.

13. Старовойтова И.А., Шакиров А.Р., Зыкова Е.С., Семёнов А.Н., Сулейманов А.М. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций // Строительные материалы. 2021. № 1-2. С. 98–104. DOI:10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104

14. Карась М.С., Кушель Р.О. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных балок, усиленных композитными тканями в середине пролёта // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. С. 122–125.

15. Масловская В.Е. Исследование и выбор методов и технологий армирования монолитных бетонных и многослойных конструкций с применением композитных материалов и композитной арматуры // Наука и молодёжь : Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 19–23 апреля 2021 года. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021. С. 137–138.

16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных

конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288–298. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298

17. Курнавина С.О., Антонов М.Д. Поле направлений трещин в железобетонных изгибаемых элементах, усиленных композитными материалами // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 3–13. DOI:10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13

18. Балдин Д.Ю., Краев А.Н., Жайсамбаев Е.А. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 2. С. 3. DOI:10.15862/05SATS220

19. Адамович Д.Н. Нормирование прочностных характеристик композитной арматуры при проектировании и расчёте бетонных и железобетонных конструкций // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 21–22 мая 2020 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2020. С. 30–34.

20. Умаров А.Г., Меретуков З.А., Умаров Р.Г. К вопросу внедрения современных материалов и технологий в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2(74). С. 285–293.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кашуба Сергей Олегович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kashuba_serгей@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.03.2022 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О., 2022

¹Merkulov S.I., ²Esipov S.M., ²Kashuba S.O.

¹Kursk State University

²Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

PRELIMINARY DESCRIPTION OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS DURING BENDING WITH TORSION

Abstract. The calculation methods of reinforced external reinforcement elements when working on torsion are considered succinctly in available sources and current regulatory documents. This article discusses a number of existing proven methods for calculating reinforced concrete bendable elements with external composite reinforcement, including when working with torsion. The necessity of introducing into the existing cal-

culatation dependences of the prerequisites for substantiating the behavior of reinforced concrete bendable elements, including those with external composite reinforcement, when working in a complex stress-strain state is described. The cases of occurrence of additional torsional forces in the conditions of classical variants of loads and impacts on the element are considered. A description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed. The main provisions of the work of reinforced concrete structures in bending with torsion are given. The main limiting states are presented. An assumptions are made about the possible presence of additional limiting states of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials. A variant of the condition of proportionality of longitudinal relative deformations for reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed.

Keywords: reinforced concrete structures with external composite reinforcement, torsion resistance with bending, strength calculation, complex stress–strain state, spatial crack.

REFERENCES

1. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom i analiz ix rezultatov]. Building and reconstruction. 2017. No. 4(72). Pp. 17–26. (rus)
2. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Results of experimental studies of cracking of reinforced concrete structures during torsion with bending [Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy treshhinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2016. No. 6(68). Pp. 22–28. (rus)
3. Demyanov A.I., Pokusaev A.A., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2017. No. 5(73). Pp. 5–14. (rus)
4. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures in torsion with bending [Nekotorye rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2018. No. 5(79). Pp. 13–23. (rus)
5. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Computational model of the formation of spatial cracks of the first type in reinforced concrete structures during torsion with bending [Raschetnaya model obrazovaniya prostranstvennykh treshhin pervogo vida v zhelezobetonnykh konstrukciyax pri kruchenii s izgibom]. Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 35–40. (rus)
6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Experimental studies of coupling of external composite nonmetallic reinforcement with concrete [Eksperimentalnye issledovaniya scephleniya vneshnej kompozitnoj nemetallicheskoj armatury s betonom]. Bezopasnost stroitelnogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. 2017. No. 1. Pp. 93–97. (rus)
7. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures reinforced with composite material [Betonnye konstrukcii, usilennye kompozitnym materialom]. Fefu: school of engineering bulletin. 2018. No. 2(35). Pp. 93–100. (rus) DOI 10.5281/zenodo.1286034
8. Esipov S.M., Esipova D.V. Criteria for the compatibility of composite external reinforcement and reinforced concrete structures under force influences [Kriterii sovmestnosti raboty kompozitnogo vneshnego armirovaniya i zhelezobetonnoj konstrukcii pri silovykh vozdeystviyakh]. Mezhdunarodnyj studencheskij stroitelnyj forum - 2018 (k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova) : Sbornik dokladov. Belgorod, November 26, 2018. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. Pp. 64–69. (rus)
9. Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures with non-metallic composite reinforcement [Betonnye konstrukcii s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. Bezopasnost stroitelnogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Kursk, November 15, 2019. Kursk: Kursk State University, 2019. Pp. 218–226. (rus)
10. Kuznetsova M.S., Popova M.V. Features of calculation of reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Osobennosti rascheta zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami]. Dni nauki studentov IASE - 2021 : Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Vladimir, March 22–09, 2021. Vladimir: Vladimir State University, 2021. Pp. 178–181. (rus)
11. Gavrilova E.O. Reinforcement of bent elements with composite materials [Usilenie izgibaemykh elementov kompozicionnymi materialami]. Akademicheskaya publicistika. 2021. No. 8–2. Pp. 111–119. (rus)
12. Volik A.R., Novitsky Ya.Ya. Experimental studies of reinforced concrete beams with external reinforcement of a stretched face with composite fabrics [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s vneshnim armirovaniem rastyanutoj grani kompozitnymi tkanyami]. Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Technique. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 117–125. (rus)

13. Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zykova E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. Investigation of physico-mechanical characteristics of modified adhesive binders for external reinforcement systems of building structures [Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik modifitsirovannykh kleevykh svyazuyushhix dlya sistem vneshnego armirovaniya stroitelnykh konstrukcij]. Building Materials. 2021. No. 1–2. Pp. 98–104. DOI:10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104 (rus)

14. Karas M.S., Kushel R.O. Experimental studies of the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with composite fabrics in the middle of the span [Eksperimentalnye issledovaniya nesushhej sposobnosti zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi tkanyami v seredine prolyota]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnykh statej. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyy universitet imeni Yanki Kupaly, 2021. Pp. 122–125. (rus)

15. Maslovskaya V.E. Research and selection of methods and technologies of reinforcement of monolithic concrete and multilayer structures using composite materials and composite reinforcement [Issledovanie i vybor metodov i tehnologij armirovaniya monolitnykh betonnykh i mnogoslojnykh konstrukcij s primeneniem kompozitnykh materialov i kompozitnoj armatury]. Science and Youth : Materials of the XVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Barnaul, April 19–23, 2021. Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2021. Pp. 137–138. (rus)

21. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures reinforced with prestressed basalt composite reinforcement [Eksperi-

mentalnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstrukcij, usilennykh predvaritelno napryazhennoj bazaltokompozitnoj armaturoj]. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2021. Vol. 17. No. 3. Pp. 288–298. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298 (rus)

16. Kurnavina S.O., Antonov M.D. The field of crack directions in reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Pole napravlenij treshhin v zhelezobetonnykh izgibaemykh elementakh, usilennykh kompozitnymi materialami]. Building and reconstruction. 2020. No. 1(87). Pp. 3–13. DOI:10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13 (rus)

17. Baldin D.Yu., Kraev A.N., Zhaysambayev E.A. Comparative analysis of ways to strengthen reinforced concrete T-beams [Sravnitelnyj analiz sposobov usileniya zhelezobetonnykh tavrovyykh balok]. Russian journal of transport engineering. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 3–20. (rus)

18. Adamovich D.N. Normalization of strength characteristics of composite reinforcement in the design and calculation of concrete and reinforced concrete structures [Normirovanie prochnostnykh harakteristik kompozitnoj armatury pri proektirovanii i raschyote betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnykh statej. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyy universitet imeni Yanki Kupaly, 2020. Pp. 30–34. DOI:10.15862/05SATS220 (rus)

19. Umarov A.G., Meretukov Z.A. On the issue of the introduction of modern materials and technologies in construction [K voprosu vnedreniya sovremennykh materialov i tehnologij v stroitelstve]. Engineering Journal of Don. 2021. No. 2(74). Pp. 285–293. (rus)

Information about the authors

Merkulov, Sergei I. DSc, Professor. E-mail: mersi-dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radischev, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kashuba, Sergei O. Postgraduate student. E-mail: kashuba99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.03.2022

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О. Предварительное описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. Preliminary description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-49-63

Грахов В.П., *Толкачев Ю.А.*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова***E-mail: ukushen13@gmail.com*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПУНКТОВ ВРЕМЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ

Аннотация. Стихийные бедствия и произошедшие на их основе техногенные катастрофы в последнее время приобретают регулярный характер. В этих условиях, первоочередной задачей государства является организация пунктов временного размещения, которые способны за короткий срок обеспечить пострадавшее население жилыми единицами. Также в случае невозможности за короткий срок обустроить постоянные места проживания, появляется задача обеспечить пункты временного размещения необходимыми объектами инфраструктуры. Целью проведенного в работе исследования, является разработка и обоснование технических предложений по созданию пунктов временного размещения населения, пострадавшего от стихийного бедствия. Для достижения поставленной цели, в процессе работы был проведен анализ литературы, связанной с существующими методами возведения пунктов временного пребывания и городков временного размещения, пострадавшего населения. Рассмотрены передовые решения строительства быстровозводимых зданий, с целью выявления наиболее оптимального решения. Результатом работы является система взаимосвязанных предложений, направленных на решение вопроса по обеспечению пострадавшего населения высококачественными жилыми единицами для проживания. В работе обоснованы решения по планировочной организации, составу, а также порядку монтажа и демонтажа пунктов временного размещения. Полученные результаты могут быть использованы при подготовке оптимальных решений развертывания временных городков для населения, пострадавшего в результате разрушительных действий стихии.

Ключевые слова: пункты временного размещения, модульное здание, быстровозводимые здания, чрезвычайная ситуация, безопасность населения.

Введение. При разработке мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, главной проблемой является сложность, а зачастую и полная невозможность предсказать и предотвратить последствия стихийных разрушений, которые наносят колоссальный материальный ущерб и лишают постоянного жилья население [1].

За период с 2000 по 2019 год во всем мире было зафиксировано 7348 крупных стихийных бедствий. А за предыдущий период, с 1980 по 1999 года, произошло 4212 природных катаклизмов. За короткий промежуток времени, количество бедствий, вызванных стихией, возросло в два раза, и согласно последним данным, их количество растет все быстрее [2]. После масштабных разрушений, не просто отдельных домов, а целых населённых пунктов, у государства возникает потребность за короткий срок обеспечить население необходимым количеством жилых единиц. Даже после завершения чрезвычайного положения, могут пройти годы до полного восстановления населённых пунктов и жилых построек соответственно.

В иерархии потребностей человека, жилище занимает первую ступень по значимости, поскольку определяет материальные условия существования человека. Качество жилья характеризуется степенью удовлетворения потребностей

населения в физическом, социальном и духовном развитии [3].

На основании этого становится целесообразным использование современных технологий для создания мобильных быстровозводимых зданий, необходимых для быстрого развертывания пунктов временного размещения. В данном случае, основной задачей быстровозводимых зданий является скорейшее возвращение пострадавшего населения к привычной жизни [4]. Это позволит в короткий срок смонтировать жилые единицы, а также предоставит возможность пострадавшему населению жить и работать в наиболее благоприятных условиях. При этом важной особенностью является скорость и качество организации территории временного проживания, которые не имеют зависимости от времени года [5].

Территория временного проживания должна обеспечивать высокий уровень комфорта, а также содержать объекты социальной инфраструктуры (продуктовые магазины, школы и медицинские учреждения, а также другие службы социальной поддержки, которые могут помочь людям оправиться от последствий стихийного бедствия и восстановить свою привычную жизнь) [6].

Материалы и методы. В рамках проведенного исследования был проведен обзор литера-

туры по организации пунктов временного размещения, для населения, пострадавшего в результате стихийных бедствий. Также, для разработки предложений по усовершенствованию системы организации пунктов временного размещения проведен системный обзор отечественной литературы, с целью обобщения опыта существующих решений, а также опыта применения быстровозводимых зданий различных технологий.

Обзор литературы позволил выявить и определить перечень требований и основных мероприятий по организации пунктов временного размещения, на основании которых была разработана система технических предложений по использованию модульных быстровозводимых зданий при организации пунктов временного размещения.

Основная часть технических предложений направлена на решение вопроса о применении во временных городках зданий и сооружений на основе готовых решений, применяемых на рынке модульного строительства. Отдельно выделены решения по планировочной организации городков временного проживания и обеспечению требуемого уровня комфорта для проживания населения, а также методики монтажа и последующего демонтажа объектов модульного строительства.

Основная часть. Размещение населения, утратившего место постоянного проживания в

результате действия стихийных бедствий или чрезвычайных ситуаций техногенного характера, производится в пунктах временного размещения (ПВР) [7]. Рассмотрим определение, которое приведено в ГОСТ Р22.3.18-2021 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Пункты временного размещения населения, пострадавшего чрезвычайных ситуациях».

Пункт временного размещения населения, пострадавшего в чрезвычайной ситуации - комплекс технических и материальных средств, оборудования и изделий, предназначенных для первоочередного жизнеобеспечения населения, пострадавшего в чрезвычайных ситуациях, вынужденных переселенцев (беженцев) и лиц, эвакуируемых из зоны чрезвычайной ситуации. ПВР могут быть развернуты на основе: палаток каркасных, быстровозводимых зданий и сооружений; общественных зданий и сооружений. Условно здания общественного назначения можно разделить на две группы: для обслуживания повседневных нужд людей и для эпизодического посещения.

Первоочередной задачей, решаемой при разработке мероприятий по совершенствованию системы организации ПВР, является их классификация, с целью определения основных вариантов развертывания пунктов. В отечественной литературе выделяют 3 основных признака классификации ПВР, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Классификация пунктов временного размещения

Признак классификации	Вид ПВР
По способу развертывания	Мобильные – на основе палаточных городков или быстровозводимых зданий; Стационарные – организованные на основе имеющихся капитальных сооружений.
По вместимости	Малой вместимости (размещение до 250 человек); Средней вместимости (размещение от 250 до 1000 человек); Большой вместимости (размещение более 1000 человек).
По исполнению	Стандартные (размещение в умеренном климате); Северные (размещение в холодном климате); Арктические (размещение в арктическом климате); Тропические (размещение в субтропическом и тропическом климатах).

К основным функциям ПВР принято относить: организацию жизнеобеспечения пострадавшего населения; регистрацию прибывающего в ПВР населения с целью предоставления временного жилья; своевременное информирование населения ПВР о текущем положении и развитии чрезвычайной ситуации, а также процессе восстановления постоянных мест проживания; последующее распределение к местам постоянного проживания [8].

На начальном этапе анализа следует выделить основные требования к ПВР, сформированные по результатам проведенного обзора литературы и которые целесообразно учитывать в данной работе. Упорядоченный набор требований позволит оценить эффективность применения быстровозводимых зданий при организации территории временных пунктов.

Жилые единицы должны учитывать вариативность компоновки, а также геологические и

климатические особенности территории временного проживания [9]. Кроме того, жилье должно быть безопасным, комфортным, экономически эффективным и долговечным.

Развертывание ПВР для населения, рекомендуется производить на территории, граничащей с зоной чрезвычайной ситуации. Наиболее оптимальным решением является размещение вблизи населённых пунктов. Это необходимо для достижения максимально эффективного использования существующих сетей инженерного обеспечения и инфраструктуры территории, на которой предполагается организация ПВР [10]. При обеспечении ПВР инженерным оборудованием следует учитывать автономность их использования, которое позволит временному пункту выполнять свои функции при любом варианте их развертывания [11].

Жилые единицы ПВР должны обладать высокой степенью мобильности, для осуществления своевременного развертывания в случаях экстренной необходимости [12]. ПВР должны иметь возможность в короткий срок транспортироваться в отдаленные и труднодоступные регионы страны, всеми возможными видами воздушного, водного и наземного транспорта [13]. Правила транспортировки элементов ПВР должны быть прописаны в документации на каждое конкретное изделие в составе ПВР.

Каждая отдельная жилая единица ПВР должна иметь срок службы не менее 10 лет, а срок гарантийного обслуживания каждой единицы составлять не менее 3 лет [14]. Постоянное перемещение ПВР не должно снижать прочностные и эксплуатационные характеристики его отдельных элементов. Порядок и правила качественного и безопасного монтажа единиц ПВР должны быть изложены в документации на изделие, принятого за основу при организации пункта.

Эффективность и скорость развертывания должна обеспечиваться за счет применения универсальных и унифицированных изделий, которые имеют типовые решения и производятся в максимальной заводской готовности. Это позволит упростить процессы монтажа и демонтажа, которые имеют циклический характер при применении в ПВР [15].

В случаях, когда ПВР не требуется использовать по назначению, необходимо предусмотреть возможность компактного и оптимального варианта складирования составных элементов, с учетом поддержания возможности последующего эффективного развертывания ПВР. Также необходимо предусмотреть вероятность возникновения ситуации, при которой потребуются ре-

монт конкретной жилой единицы в процессе эксплуатации. На основании этого представляется необходимым предусмотреть возможность замены элементов конструкции жилых единиц ПВР, с учетом применения минимальных затрат труда и ресурсов [16]. При развертывании составных частей необходимо использовать наиболее доступное на рынке отечественное оборудование и материалы.

Условия временного проживания и труда в ПВР должны соответствовать санитарно-гигиеническим и санитарно-эпидемиологическим требованиям, для обеспечения безопасности человека. Санитарно-гигиеническая зона должна включать в себя на постоянной основе санузел и душевые [17]. Также в соответствии с ГОСТ 30494-2011 устанавливается допустимая температура внутреннего воздуха для жилых помещений (18 °С–24 °С). Жилые единицы ПВР также должны отвечать этим требованиям, вне зависимости от способа их развертывания [18].

При планировании размещения жилых единиц ПВР следует учитывать рекомендации по размещению данной зоны с наветренной стороны, относительно остальных зон функционального назначения [19].

Для ПВР, установленная жилая площадь на одного человека составляет 2,5–3 м²/чел. На основании данного показателя рекомендуется рассчитывать необходимое количество жилых единиц при организации временных пунктов. Стоит отметить, что помещения нежилого назначения не учитываются в вышеуказанном нормативе, что означает необходимость дополнительно учитывать бытовые помещения, обязательные нежилые пространства и помещения для питания [20].

Обеспечение населения жилой площадью является не единственным требованием при организации и планировании территории ПВР. Инфраструктура ПВР также должна включать следующие виды жизнеобеспечения: медицинские пункты, с целью поддержания жизни и здоровья населения; учреждения образования и развития детей (школы и детские сады); зоны приготовления и приема пищи; бытовые зоны, обеспечивающие возможность стирки, сушки и ремонта одежды; зону хранения личного транспорта пострадавшего населения и административного персонала ПВР; зоны развлечения и отдыха; магазины, с продуктами первой необходимости; мероприятия по обеспечению безопасности проживающего населения.

Также стоит отметить необходимость соблюдения требований и норм, предъявляемых к временным зданиям и сооружениям, включая пожарную безопасность. Материалы, используемые в качестве основы для элементов ПВР

должны обеспечивать экологическую безопасность и препятствовать распространению огня, при возникновении непредвиденных ситуаций [21]. Все элементы, включенные в состав ПВР, должны обеспечивать безопасность их эксплуатации, включая электробезопасность и пожаробезопасность [22].

В настоящее время, в строительной отрасли выделяют следующие виды быстровозводимых зданий: на основе использования металлического каркаса и сэндвич-панелей; здания из деревянных панелей; быстровозводимые здания из СИП-панелей; модульные мобильные здания [23]. Наиболее эффективным вариантом быстровозводимого здания, для организации пункта временного размещения в соответствии со всеми вышеперечисленными требованиями, является использование модульных мобильных зданий [24].

Здания на основе блок-модулей обеспечивают максимальную заводскую готовность, которая позволяет значительно снизить сроки и трудозатраты на развертывание временных пунктов. Основным преимуществом при использовании модульных зданий является возможность многократной транспортировки отдельных блок-модулей, без снижения их качества в процессе монтажа [25]. При необходимости здание из блок-модулей может быть легко пристроено или перестроено под новый объект, в зависимости от потребностей населения [26].

Модульные здания — это быстровозводимые здания, состоящие из нескольких объемных блоков, называемых блок-модулями. Каждый отдельный блок-модуль производят на заводе-изготовителе, с достижением максимальной заводской готовности, после чего он отправляется на отдаленный строительный объект.

Кроме того, производство каждого блок-модуля осуществляется сразу с внешней и внутренней отделкой, предварительно выбранной заказчиком, в строгом соответствии с проектом. Однако окончательная сборка блок-модулей, а также дополнительных элементов и конструкций, производится непосредственно на строительной площадке. Предварительно собранные блок-модули размещаются с помощью крана на заранее подготовленном фундаменте, после чего соединяются вместе, образуя единое модульное здание.

В качестве основы для устройства модульных зданий небольших размеров могут служить простые конструкции из сборных фундаментных балок [27]. В некоторых случаях, при строительстве жилых зданий из отдельных блок-модулей, возможен монтаж модульного здания непосредственно на заранее выровненную и уплотненную

поверхность, без предварительно подготовленной фундаментной основы.

Компоновка блок-модулей не ограничивается расположением бок о бок. Это позволяет модульным зданиям иметь сложную конфигурацию в плане, а за счет достаточно широкой линейки универсальных размеров блок-модулей, можно добиться практически любых значений габаритов здания [28].

Несущий каркас каждого отдельного объемного блока состоит из сложногогнутых стальных холодногнутых профилей, специально изготовленных для реализации объектов модульного строительства. Специально изготовленные профили позволяют упростить процесс монтажа модульного здания, а также влияют на прочностные характеристики блок-модулей и здания в целом [29]. Важной особенностью является большой запас по прочности несущих конструкций, с целью возможности передислокации объекта модульного строительства в новый климатический район.

Основой для теплоизоляции блок-модулей является утеплитель из минеральной ваты плотностью 30–40 кг/м². Толщина утеплителя принимается в соответствии с теплотехническим расчетом. Все материалы, применяемые при производстве модульных зданий, имеют группу горючести НГ. Наружные стены и внутренние перегородки модульного здания выполняются из стеновых сэндвич-панелей, в которых заранее предусматривается усиление под устройство навесного оборудования [30].

Модульные здания транспортируются к месту строительства в упаковках типа «транспак», которые позволяют значительно снизить затраты на транспортировку и увеличить скорость развертывания ПВР, за счет сокращения сроков перевозки. «Транспак» упаковка представляет собой набор элементов конструкций в разобранном виде, которые комплектуются в компактную упаковку [31]. Потолочная и напольная рама образуют основание для такой упаковки, после чего внутрь укладываются оставшиеся элементы каркаса, а также прочие элементы, необходимые для окончательной сборки готового здания.

Технология строительства зданий с использованием модульной технологии предусматривает необходимые удобства для проживания и отдыха населения. Окончательная отделка, а также устройство всех систем (отопления, водоснабжения, вентиляции и т.д.) и электрического оборудования, происходит на этапе изготовления каждого отдельного блок-модуля [32].

Предложения по созданию пунктов временного размещения. Большинство существующих решений для возведения временного жилья

являются сборными, серийно производимыми и стандартизированными. Однако предлагаемые варианты временного жилья - одноэтажные, и не подходят для крупных городов, с большой плотностью населения, ограниченной доступностью земли и сосредоточенной инфраструктурой [33]. Для решения этих проблем в качестве временного жилья для оказания помощи в случае стихийных бедствий предлагается рассматривать модульные здания средней этажности, что позволит увеличить количество квадратных метров, приходящихся на одного человека, без значительного увеличения территории ПВР.

Модульные здания позволяют организовать здания различных назначений: производственные, административные, складские, общественные и жилые. В свою очередь, это позволяет обеспечить пункт временного размещения необходимыми для комфортного существования объектами инфраструктуры.

Для рассматриваемых видов ПВР, с целью обеспечения комфортного уровня проживания, основанием для расчета количества жилых блок-модулей является ориентация на увеличение жилой площади, приходящейся на одного человека, до 6 м². Таким образом, на основании классификации ПВР по вместимости можно определить количество жилых блок-модулей стандартного размера. Стоит отметить, что предложенный вариант организации жилой зоны в ПВР подразумевает размещение населения в трехэтажном модульном здании, каждый этаж которой разделяется на отдельные жилые секции, имеющие собственные санитарные узлы, душевые комнаты и зоны для приема пищи. На каждом этаже модульного здания жилого типа размещаются зоны для приготовления пищи и отдыха, а также бытовая зона.

Жилая зона временного пункта занимает примерно 45-50 % от общей площади ПВР. Остальную площадь занимают зоны административного и коммунально-бытового назначения. Основной идеей организации планировочной структуры является компактность и четкость зонирования при помощи улично-дорожной сети временного или постоянного характера на территории ПВР. Для организации временных дорожных покрытий на территории ПВР предлагается использовать полимерные дорожные плиты, которые обеспечивают безопасность эксплуатации и эффективность их монтажа [34].

В предлагаемый состав административной и общественных зон ПВР, помимо отдельно стоящего пункта приготовления и приема пищи необходимо включать: медицинский пункт, помещение комендантской службы, помещения обязательного административного персонала

(пункт приемы, регистрации и оформления поступающего населения, а также здания и сооружения для службы материально-технического обеспечения населения).

Помещения медицинского назначения размещаются в одном здании, которое расположено в непосредственной близости к зданию административного регулирования. Медицинский пункт, в обязательном порядке включает следующие помещения: кабинеты врачей, процедурную, стоматологический кабинет, помещения лазарета и аптечный пункт. Модульное здание медицинского пункта двухэтажное, состоящее из блок-модулей типовых размеров.

Первоочередной задачей при создании временного жилья, для пострадавшего населения, является обеспечение жилых мобильных зданий электричеством, водоснабжением, теплоснабжением и канализацией. При сооружении инженерных сетей применяются унифицированные, изготовленные в заводских условиях сборно-разборные элементы с быстроразъемными соединениями.

Необходимость развертывания ПВР возникает вне зависимости от погодных условий и периода времени. На основании этого, требуется обеспечить помещения элементов ПВР отоплением. Использование электроэнергии, для обеспечения элементов ПВР теплоснабжением, допускается только в случае крайней необходимости и на основе технико-экономического обоснования. Такой метод считается наиболее дорогостоящим, однако в условиях удаленности от внешних источников, такое решение может позволить за короткий срок и с применением минимальных трудозатрат произвести обогрев всех необходимых помещений в составе ПВР [35].

Предпочтительнее всего использовать модульные котельные, которые предназначены для нужд системы отопления жилых и производственных зданий. Блочно-модульные котельные полностью автоматизированные системы, и не нуждаются в постоянном присутствии обслуживающего персонала [36]. На рынке модульных зданий имеется большой выбор вариантов типовых модульных котельных: на газовом, твердом и жидком топливе. Котельные располагаются в центре тепловых нагрузок, а также на основе данных о преобладающем направлении ветра.

Готовые решения модульных зданий позволяют при наличии внешних источников электроэнергии, обеспечить электроэнергией временные дома, общественные здания, инженерное оборудование, а также всю территорию пунктов временного размещения. В случае отсутствия источников электроэнергии, модульные системы поз-

воляют в короткий срок организовать блочно-модульную электростанцию для обеспечения населения электричеством. Для обеспечения электроэнергией ПВР предлагается использовать электростанции типа АВЭ(Н), которые разработаны с учетом возможности применения в модульном строительстве [37].

Каждое модульное здание имеет распределительный щит. Сборка и проверка системы электроснабжения, а также основанного оборудования производится на заводе-изготовителе в процессе производства. Освещение внутри помещений выполнено с использованием светодиодных ламп заводского изготовления, которые полностью соответствуют требованиям нормативов. Дополнительно, в каждом модульном здании устанавливаются светильники аварийного освещения с блоками аварийного питания, которые обеспечивают их работу в аварийном режиме не менее одного часа. Данные решения позволяют обеспечить экономичность и долговечность применения электрических приборов в модульном здании.

Для защиты от поражения электрическим током при повреждении изоляции в модульных зданиях предусмотрены следующие меры защиты: защитное заземление, автоматическое отключение питания, уравнивание потенциалов.

Большинство производителей модульных зданий выпускает насосные станции водоснабжения, которые забирают воду из естественных поверхностных и подземных источников. После этого вода поступает на станцию водоочистки, основанную на готовых комплексных модульных решениях [38]. Однако установка таких блок-модулей потребует производства необходимых изыскательских работ.

Для увеличения скорости обеспечения населения водой, а также при условии отсутствия возможности подключения к централизованной системе водоснабжения, можно воспользоваться привозной водой. В таком случае, норму водопотребления на одного человека в сутки можно уменьшить практически в два раза. При использовании данного решения, среднесуточная норма потребления воды временного пункта малой вместимости составит примерно 2500 литров в сутки.

Модульное здание для проживания населения может быть оборудовано насосными станциями, станциями автоматической подкачки воды, проточными водонагревателями, а также накопительными баками достаточного объема для обеспечения автономного существования временных пунктов.

Местная канализация также может быть подключена к центральным канализационным системам или отведена к специальным накопительным системам, в соответствии со всеми правилами действующей нормативной документации. В таком случае, воду из накопительных систем планируется забирать с помощью специальной ассенизаторской машины, с периодичностью один раз в неделю [39].

При разработке системы вентиляции в зданиях модульного типа основным вариантом применения является естественная вентиляция. Основным преимуществом данной системы является ее простота, а также упрощение процесса монтажа модульного-здания [40]. Также стоит отметить, что данная система не зависит от электрической сети, что позволяет упростить электрическую схему и снизить площадь нагрузки на модульные электростанции. В условиях, не позволяющих эффективно использовать систему естественной вентиляции возможно применение вентиляции принудительного типа, которая осуществляется с помощью электрических вентиляторов, приборов и системы управления ими.

Наружное освещение территории ПВР предполагается организовывать посредством устройства светотехнического оборудования на каждом отдельном модульном здании, с целью упрощения монтажа отдельных элементов благоустройства. Это позволит сократить трудозатраты на организацию освещения пункта временного пребывания. Для наружного освещения применяются светодиодные лампы уличного исполнения.

Территория ПВР огораживается металлическим забором со встроенной системой подсветки, для поддержания требуемого уровня освещения и безопасности на территории ПВР. На территории ПВР располагается КПП, а также основное здание административного назначения. Отдельно стоит выделить предложение по размещению складской зоны, собранной из готовых решений модульного строительства, позволяющее обеспечить автономность пункта при возникновении непредвиденных обстоятельств.

Готовые решения модульного производства позволяют облегчить и ускорить процесс развертывания временных жилищ, не снижая уровня качества готового пункта временного пребывания. За счет применения модульных зданий при развертывании ПВР можно добиться снижения необходимой площади территории, за счет увеличения этажности основных элементов.

В результате проделанной работы была составлена таблица 2, которая содержит решения по типовому составу и варианты их исполнения. Планировочное решение первого и типового этажей жилого здания представлены на рисунке 1.

Таблица 2

Типовые решения для элементов ПВР в зависимости от планируемой вместимости

Наименование элемента	Количество типовых элементов, в зависимости от вместимости ПВР, шт			Примечание
	250 чел.	1000 чел.	2000 чел.	
1. Жилая зона				
1.1. Модульные здания для проживания	4	15	30	Типовые модульные здания для проживания, основанные на использовании 39 блок-модулей стандартных размеров. Габаритный размер в плане 15 x 21 м. Высотой 3 этажа. Вместимость одного модульного здания – 66 человек.
1.2. Зоны развлечения и отдыха	1	2	4	Готовые игровые комплексы, а также площадка для активных игр. Скамейки для отдыха.
1.3. Стоянка для автомобилей	42	158	316	Расчетное количество парковочных мест для пострадавшего населения принято на основании 1 парковочное место на жилую единицу модульного здания. На территории ПВР располагается 40% от расчетного количества.
1.4. Зона хранения и вывоза твердых бытовых отходов	1	3	6	
2. Общественная зона				
2.1. Центр развития детей	0	1	1	Собирается из универсальных блоков, которые позволяют обеспечить требуемое количество мест.
2.2. Зона приготовления и приема пищи	1	1	1	
2.3. Магазин	1	1	2	Типовые модульные здания, для обеспечения товарами население, собирается из 4 блок-стандартных размеров. Габаритный размер в плане 6 x 12 м.
2.4. Медицинский пункт	1	1	2	Типовое модульное здание, для поддержания здоровья населения, собирается из 24 блок-модулей стандартных размеров. Габаритный размер в плане 12 x 18 м. Высотой 2 этажа.
2.5. Зона бытового обслуживания	1	2	3	Типовое модульное здание, для ремонта одежды, собирается из 3 блок-модулей типового размера. Габаритный размер в плане 6 x 9 м.
3. Административная зона				
3.1. Здание для администрации ПВР	1	1	1	Типовые модульные здания для проживания, собирается из 39 блок-модулей стандартных размеров. Габаритный размер в плане 15 x 21 м. Высотой 3 этажа.
3.2. КПП	1	1	1	Типовое решение для контрольного пропускного пункта из 2 блок-модулей стандартных размеров. Габаритный размер в плане 6 x 6 м.
3.3. Зона хранения имущества и предметов первой необходимости	1	2	3	Готовые модульные решения для организации здания для складирования ресурсов.
4. Зона электроснабжения	1	1	2	Готовые модульные решения для обеспечения электрической энергией.
5. Зона водоснабжения	4	4	9	Готовые модульные решения забора, очистки и хранения воды.
6. Зона теплоснабжения	1	2	4	Готовые модульные решения для выработки горячей воды.

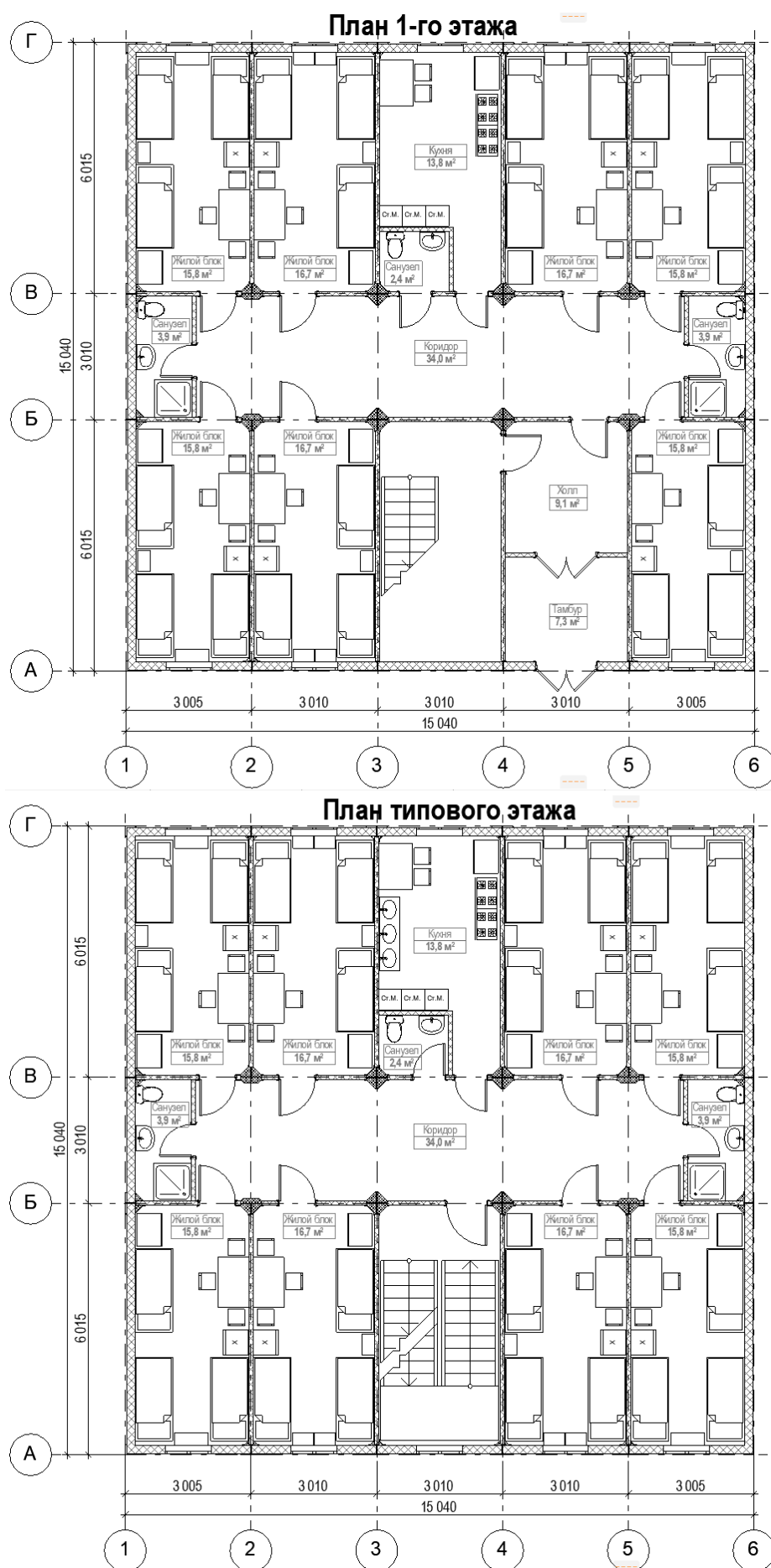


Рис. 1. Планы 1-го и типового этажей модульного здания для проживания

Заключение. Модульные здания имеют множество существенных преимуществ. Они обеспечивают идеальную работоспособность, простоту сборки и последующего демонтажа, а также позволяют без лишних трудозатрат и в короткий срок обеспечить жильем население, пострадавшее в результате чрезвычайной ситуации. Срок службы таких зданий превышает 30 лет, с учетом необходимости многократного повторного использования.

Использование модульных зданий для организации пунктов временного размещения предполагает разработку проектов ПВР для каждого конкретного региона применения, с возможностью быстрой передислокации элементов ПВР в соседний район, в случае экстренной необходимости. Такое решение позволит добиться наиболее эффективного варианта использования материалов и инженерного оборудования для каждой конкретной ситуации, что позволит сократить затраты труда при монтаже и ресурсы на этапе производства.

Технические предложения по созданию временного жилья, развернутого на основе модульных зданий, полностью соответствуют действующим нормативно-правовым документам, а также установленным санитарно-эпидемиологическим требованиям и учитывают методические рекомендации по организации первоочередного жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях.

Предложенные в работе решения позволяют увеличить площадь полезную площадь жилых и общественных зданий, при этом не увеличивая территорию развертывания ПВР. Все это позволит обеспечить пострадавшему населению возможность проживать в благоприятных условиях и поспособствует скорейшему возвращению к привычной жизни.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писарева О.А. Использование геоинформационных систем для управления базами данных, связанными со стихийными бедствиями // *Modern Science*. 2021. № 12-2. С. 395–399.
2. Пфаф В.К., Лисых В.В., Панченков В.Е., Щербатов М.В. Влияние стихийных бедствий на экономику страны // Сб. статей Международной научной конференции «Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности». Костанай, 01-05 ноября 2021 г. Чебоксары: Изд-во ООО «Издательский дом «Среда», 2021. С. 11-13. doi:10.31483/r-99797.
3. Мохначев С.А., Грахов В.П., Балтачев Н.С. Анализ основных проблем формирования

современных проектов малоэтажной жилой застройки // *Управленческий учет*. 2022. № 1-2. С. 292–298. doi:10.25806/uu1-22022292-298.

4. Почивалов А.А., Кружилин Д.А. Перспективы применения современных безопасных технологий строительства быстровозводимых зданий для постоянного проживания пострадавшего в чрезвычайных ситуациях населения // Сб. статей Международной научной конференции «Проблемные вопросы инженерной защиты населения и территорий». Химки, 22 марта 2018 г. Химки: Изд-во «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2018. С. 38–43.

5. Ferdous W., Bai Yu., Ngo T., Manalo A., Mendis P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings-A state-of-the-art review // *Engineering Structures*. Vol. 183. 2019 Pp. 883–893. doi:10.1016/j.engstruct.2019.01.061

6. Синьков В.Г. Об организации работы пунктов временного размещения граждан на территории Российской Федерации // Сб. статей Международной научной конференции «Совершенствование гражданской обороны в Российской Федерации». Ногинск, 06 июня 2017 г. Москва: Изд-во «ВНИИ ГОЧС МЧС России», 2017. С. 87-96.

7. Мозгов В.В., Ляшенко С.М. О применении оптимизационных методов при организации функционирования пунктов временного размещения пострадавшего населения // Сб. статей Международной научной конференции «Техносферная безопасность, проблемы и перспективы». Химки, 19 ноября 2020 г. Химки: Изд-во «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2020. С. 134–137.

8. Сафонов А.В., Курбатов М.Ю. Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений МЧС России // Сб. статей Международной научной конференции «Международная гуманитарная помощь: опыт, реалии, перспективы. Актуальные вопросы формирования культуры безопасности населения (международные аспекты)». Ногинск, 07 июня 2018 г. Москва: Изд-во «ВНИИ ГОЧС МЧС России», 2018. С. 498–503.

9. Ишмаматов Р.Х. Современные тенденции формирования вахтовых поселений нефтегазовой отрасли // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 1 (82). С. 254–266.

10. Трофимов А.В., Ерофеев М.Н. Обоснование рациональных составов оборудования, схем размещения, технологий развертывания и технико-экономических оценок пунктов временного размещения пострадавшего населения // Сб. статей Международной научной конференции «Международная гуманитарная помощь: опыт, реалии, перспективы. Актуальные вопросы формирования культуры безопасности населения (международные аспекты)». Ногинск, 07 июня 2018 г. Москва: Изд-во «ВНИИ ГОЧС МЧС России», 2018. С. 586–599.
11. Седнев В.А. Научно-методический подход обоснования системы электроснабжения автономных полевых лагерей // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 4. С. 13–18. doi:10.25257/FE.2018.4.13-18.
12. Цимбал В.А., Блохин А.А., Аксенов С.В. Комплексная методика обоснования рационального места размещения склада материальных ресурсов субъекта Российской Федерации для первоочередного жизнеобеспечения пострадавшего населения // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 1 (36). С. 11–19.
13. Тодосейчук С.П., Лагутина А.В. Обоснование состава и общие технические требования к инженерному оборудованию пунктов временного размещения пострадавшего населения в чрезвычайных ситуациях // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 2 (6). С. 422–433.
14. Трофимов А.В. Эксплуатация транспортно-технологической техники в системе МЧС России при развертывании ПВР // Сб. статей Международной научной конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». Москва, 01 марта 2021 г. Москва: Изд-во «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», 2021. С. 265–271.
15. Демьянов А.А., Булай В.П., Блинов С.А. Перспективные высокотехнологичные мобильные комплексы (модули) для улучшения условий быта военнослужащих при размещении в пунктах дислокации на неподготовленных территориях (полевых условиях) // Сб. статей Международной научной конференции «Формирование системы материально-технического обеспечения военной организации государства: теория и практика». Пермь, 20 октября 2017 г. Пермь: Изд-во «Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации»», 2017. С. 200–207.
16. Седнев В.А. Рекомендации по составу средств для электроснабжения и жизнеобеспечения пострадавшего населения и спасательных формирований при полевом размещении. Технологии техносферной безопасности. 2021. № 3 (93). С. 208–225. doi:10.25257/TTS.2021.3.93.208-225.
17. Дианов Д.В. Формирование системы статистических показателей создания объектов первичного рынка недвижимости // Статистика и Экономика. 2020. Т. 17. № 1. С. 14–24. doi:10.21686/2500-3925-2020-1-14-24.
18. Викторова Т.Н., Романова Т.Г., Иванова О.В., Шалгинова Е.Ю. Актуальные вопросы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения Республики Хакасия при ликвидации последствий чрезвычайной ситуации в 2015 г. // Инфекция и иммунитет. 2017. № 5. С. 528.
19. Бахтиярова О.Н., Малышев Е.В., Глотов Е.Н. Выбор направления эвакуации населения в случае аварии на химически опасном объекте с учетом преобладающих направлений ветра // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 1 (36). С. 20–23.
20. Мамедов В.Ш., Гура Е.А., Щербина Ю.Г., Есаков А.О., Рослякова О.В. Гигиенические и противоэпидемические требования и нормы к организации и функционированию пунктов временного размещения эвакуированного населения в условиях чрезвычайных ситуаций мирного времени // Вестник гигиены и эпидемиологии. 2021. Т. 25. № 1. С. 92–97.
21. Лубочкин Р.В., Завьялов Д.Е., Савенкова А.Е. Нормативная правовая база мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, защиты от чрезвычайных ситуаций // Наукосфера. 2020. № 10-2. С. 38–44.
22. Трофимов А.В. Пожарно-технический надзор в области пожарной безопасности при развертывании и эксплуатации ПВР // Сб. статей Международной научной конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». Москва, 01 марта 2021 г. Москва: Изд-во «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», 2021. С. 253–261.
23. Wenhui L., Hong Z., Qian W., Tianran H., Hong X., A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings // Advances in Civil Engineering. Vol. 2021. 18 p. doi:10.1155/2021/8869315.
24. Грахов В.П., Толкачев Ю.А. Методика сравнения вариантов быстровозводимого временного жилья для размещения населения, пострадавшего в результате стихийного бедствия // ЦИТИСЭ. 2022. № 2. С. 317–326. doi:10.15350/2409-7616.2022.2.27

25. Ангарский Е.В., Пиотрович А.А. Инновационные конструкции быстровозводимых модульных зданий для современных строительных площадок Севера Дальнего Востока Российской Федерации // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2017. Т. 2. С. 8–13.

26. Жукова Л.Г. Модульные здания // Инновационная наука. 2017. № 12. С. 211–215.

27. Преснов О.М., Баденкова А.И., Бойко В.Н., Позднякова Е.А. Сборно-разборный фундамент для мобильных домов // Инновации и инвестиции. 2022. № 1. С. 174–179.

28. Алимпиева А.Н., Кузмичева Ю.С., Козикова И.Н. Особенности технологии строительства в условиях севера // Сб. статей межвузовской научной конференции «Новые технологии в учебном процессе и производства». Рязань, 17–19 апреля 2018 г. Рязань: Изд-во «Индивидуальный предприниматель Жуков Виталий Юрьевич», 2018. С. 314–318.

29. Кизимова О.В., Пронин В.Е. Блок-модульные контейнеры из эффективных стальных профилей // Сб. статей Международной научной конференции «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS». Пенза, 30 августа 2018 г. Пенза: Изд-во «Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.)», 2018. С. 40–43.

30. Ли Ж., Чжу Ц., Банцерова О.Л. Оценка теплового комфорта для рабочих на стройплощадке в блочно-модульном здании из сэндвич-панелей // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 60–65. doi:10.33622/0869-7019.2019.02.60-65.

31. Герасимов М.Д., Иванов В.И. Анализ рынка модульных конструкций // Сб. статей межвузовской конференции «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства». Белгород, 2018 г. Белгород: Изд-во «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2018. С. 123–126.

32. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Комфортное жилье нового индустриального поколения // Строительное производство. 2020. № 2. С. 23–28. doi:10.54950/26585340_2020_2_23

33. Ghannad, P.; Lee, Y.-C.; Choi, J.O. Feasibility and implications of the modular construction approach for rapid post-disaster recovery // International Journal of Industrialized Construction. Vol. 1. 2020. Pp. 64–75. doi:10.29173/ijic220

34. Куницкая О.А., Рудов С.Е., Зорин М.В. Перспективы использования пластиковых плит строительства временных транспортных путей // Сб. статей Всероссийской научной конференции «Машиностроение: новые концепции и технологии». Красноярск, 23 октября 2020 г. Красноярск: Изд-во «ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2020. С. 98–103.

35. Леонтьев В.А., Олейник Д.С., Яшенко А.К., Сармина А.А. Отопление индивидуального жилого дома в условиях отсутствия системы централизованного газоснабжения // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2021. № 2 (33). С. 149–155.

36. Сотникова О.А., Донцов А.В. Достоинства блочно-модульных котельных // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 2. С. 36–40.

37. Ипполитов В.А., Путера А.Е., Крюков О.В. Перспективы строительства объектоориентированных электростанций для новых энергетических проектов // Главный энергетик. 2021. № 7. С. 10–23.

38. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Цыба А.А., Балчугов Д.В., Монахов Д.Н. Подготовка поверхностных и подземных вод для питьевого водоснабжения поселков в Арктической зоне // Academia. Архитектура и строительство. 2020. №3. С. 138–142. doi:10.22337/2077-9038-2020-3-138-142

39. Кынева А.И., Павлов С.Я. Система водочистки модульной гостиницы в республике Саха (Якутия) // Сб. статей Международной научной конференции «Неделя науки СПбПУ». Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 г. Изд-во «ПОЛИТЕХ-ПРЕСС», 2018. С. 181–183.

40. Филиппов И.В., Лопаницына Е.С. Производство и строительство модульных зданий из блок-контейнеров. Техническое представление // Дневник науки. 2019. № 4 (28). С. 70.

Информация об авторах

Грахов Валерий Павлович, доктор экономических наук, профессор. E-mail: pgs@istu.ru. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, д.7.

Толкачев Юрий Александрович, магистрант инженерно-строительного факультета. E-mail: ukushen13@gmail.com. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, д.7.

Поступила 04.06.2022 г.

© Грахов В.П., Толкачев Ю.А., 2022

Grakhov V.P., *Tolkachev Yu.A.
 Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 *E-mail: ukushen13@gmail.com

PROSPECTS FOR THE USE OF MODULAR CONSTRUCTION IN THE ORGANIZATION OF TEMPORARY ACCOMMODATION

Abstract. *Natural disasters and subsequent man-made disasters have recently become regular. In these conditions, the primary task of the State is the organization of temporary accommodation points capable of providing the affected population with housing units in a short time. In addition, if it is impossible to equip permanent places of residence in a short time, there is a task to provide temporary accommodation facilities with the necessary infrastructure. The purpose of the research is to develop and substantiate technical proposals for the creation of temporary accommodation facilities for the population affected by a natural disaster. In order to achieve this goal, an analysis of the literature related to the existing methods of erecting temporary stay points and temporary accommodation towns for the affected population is carried out. Advanced solutions for the construction of prefabricated buildings are considered in order to determine the most optimal solution. The result of the work is a system of interrelated proposals aimed at solving the issue of providing the population with high-quality living space. The article substantiates decisions on the organization of planning, composition, as well as the order of installation and dismantling of temporary accommodation facilities. The results obtained can be used in the preparation of optimal solutions for the deployment of temporary towns for the population affected by the destructive actions of the elements.*

Keywords: *temporary accommodation facilities, modular building, prefabricated buildings, emergency situation, public safety.*

REFERENCES

1. Pisareva O.A. The use of geoinformation systems for managing databases related to natural disasters [Ispol'zovanie geoinformacionnyh sistem dlya upravleniya bazami dannyh, svyazannymi so stihijnymi bedstviyami]. *Modern Science*. 2021. No. 12-2. Pp. 395–399.
2. Pfaf V.K., Lisykh V.V., Panchenkov V.E., Shcherbatov M.V. The impact of natural disasters on the country's economy [Vliyanie stihijnyh bedstvij na ekonomiku strany]. Collected papers of the International Scientific Conference "Actual problems of management, economics and economic security". Kstanay, November 01-05, 2021. Cheboksary: Publishing House "Publishing House "Wednesday", 2021. Pp. 11–13. (rus) doi:10.31483/r-99797.
3. Mokhnachev S.A., Grakhov V.P., Baltachev N.S. Analysis of the main problems of formation of modern projects of low-rise residential development [Analiz osnovnyh problem formirovaniya sovremennyh proektov maloetazhnoj zhiloy zastrojki]. *Management accounting*. 2022. No. 1-2. Pp. 292–298. (rus) doi:10.25806/uu1-22022292-298.
4. Pochivalov A.A., Kruzhilin D.A. Prospects for the application of modern safe technologies for the construction of prefabricated buildings for permanent residence of the affected population in emergency situations [Perspektivy primeneniya sovremennyh bezopasnyh tekhnologij stroitel'stva bystrovozvodimyh zdaniy dlya postoyannogo prozhivaniya postradavshego v chrezvychajnyh situatsiyah naseleniya]. Collected papers of the International Scientific Conference "Problematic issues of engineering protection of the population and territories". Khimki, March 22, 2018. Khimki: Publishing House "Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters", 2018. Pp. 38–43. (rus)
5. Ferdous W., Bai Yu., Ngo T., Manalo A., Mendis P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings-A state-of-the-art review. *Engineering Structures*. Vol. 183. 2019. Pp. 883–893. doi:10.1016/j.eng-struct.2019.01.061
6. Sinkov V.G. On the organization of work of temporary accommodation of citizens on the territory of the Russian Federation [Ob organizatsii raboty punktov vremennogo razmeshcheniya grazhdan na territorii Rossijskoj Federatsii]. Collected papers of the International Scientific Conference "Improvement of civil defense in the Russian Federation". Noginsk, June 06, 2017. Moscow: Publishing House "All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia", 2017. Pp. 87–96. (rus)
7. Mozgov V.V., Lyashenko S.M. On the application of optimization methods in the organization of the functioning of temporary accommodation facilities for the affected population [O primenenii optimizacionnyh metodov pri organizatsii funkcionirovaniya punktov vremennogo razmeshcheniya postradavshego naseleniya]. Collected papers of the International Scientific Conference "Problematic issues of engineering protection of the population and

territories". Khimki, 19-11, 2020. Khimki: Publishing House "Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters", 2020. Pp. 134–137. (rus)

8. Safonov A.V., Kurbatov M.Yu. Assessment of seismic resistance of buildings and structures of the Ministry of Emergency Situations of Russia [Ocenka sejsmostojkosti zdaniy i sooruzhenij MCHS Rossii]. Collected papers of the International Scientific Conference "International humanitarian aid: experience, realities, prospects. Topical issues of the formation of a culture of public safety (international aspects)". Noginsk, June 07, 2018. Moscow: Publishing House "All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia", 2018. Pp. 498–503. (rus)

9. Ishmametov R.H. Modern trends in the formation of shift settlements of the oil and gas industry [Sovremennye tendencii formirovaniya vahtovykh poselenij neftegazovoj otrasli]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2021. No. 1 (82). Pp. 254–266. (rus)

10. Trofimov A.V., Erofeev M.N. Substantiation of rational equipment compositions, placement schemes, deployment technologies and technical and economic assessments of temporary accommodation facilities for the affected population [Obosnovanie racional'nykh sostavov oborudovaniya, skhem razmeshcheniya, tekhnologij razvertyvaniya i tekhniko-ekonomicheskikh ocenok punktov vremennogo razmeshcheniya postradavshogo naseleniya]. Collected papers of the International Scientific Conference. Collected papers of the International Scientific Conference "International humanitarian aid: experience, realities, prospects. Topical issues of the formation of a culture of public safety (international aspects)". Noginsk, June 07, 2018. Moscow: Publishing House "All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia", 2018. Pp. 586–599. (rus)

11. Sednev V.A. Scientific and methodological approach to substantiating the power supply system of autonomous field camps [Nauchno-metodicheskij podhod obosnovaniya sistemy elektrosnabzheniya avtonomnykh polevykh lagerej]. Fires and emergencies: prevention, elimination. 2018. No. 4. Pp. 13–18. (rus) doi:10.25257/FE.2018.4.13-18.

12. Cimbal V.A., Blokhin A.A., Aksenov S.V. A comprehensive methodology for substantiating the rational location of the warehouse of material resources of the subject [Kompleksnaya metodika obosnovaniya racional'nogo mesta razmeshcheniya sklada material'nykh resursov sub"ekta Rossijskoj

Federacii dlya pervoocherednogo zhizneobespecheniya postradavshogo naseleniya]. Scientific and educational problems of civil protection. 2018. No. 1 (36). Pp. 11–19. (rus)

13. Todoseychuk S.P., Lagutina A.V. Substantiation of the composition and general technical requirements for engineering equipment of temporary accommodation facilities for the affected population in emergency situations [Obosnovanie sostava i obshchie tekhnicheskie trebovaniya k inzhenernomu oborudovaniyu punktov vremennogo razmeshcheniya postradavshogo naseleniya v chrezvychajnykh situacijah]. Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. 2020. No. 2 (6). Pp. 422–433. (rus)

14. Trofimov A.V. Operation of transport and technological equipment in the system of the Ministry of Emergency Situations of Russia during the deployment of PVR [Ekspluatatsiya transportno-tekhnologicheskoy tekhniki v sisteme MCHS Rossii pri razvertyvanii PVR]. Collected papers of the International Scientific Conference "Civil Defense on guard of peace and security". Moscow, March 01, 2021. Moscow: Publishing House "Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia", 2021. Pp. 265–271. (rus)

15. Demyanov A.A., Bulai V.P., Blinov S.A. Promising high-tech mobile complexes (modules) for improving the living conditions of military personnel when stationed at locations in unprepared territories (field conditions) [Perspektivnye vysokotekhnologichnye mobil'nye komplekсы (moduli) dlya uluchsheniya uslovij byta voennosluzhashchih pri razmeshchenii v punktah dislokacii na nepodgotovlennyykh territoriyah (polevykh usloviyah)]. Collected papers of the International Scientific Conference "Formation of the system of material and technical support of the military organization of the state: theory and practice". Perm, October 20, 2017. Perm: Publishing House "Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation", 2017. Pp. 200–207. (rus)

16. Sednev V.A. Recommendations on the composition of means for power supply and life support of the affected population and rescue units during field deployment [Rekomendacii po sostavu sredstv dlya elektrosnabzheniya i zhizneobespecheniya postradavshogo naseleniya i spasatel'nykh formirovanij pri polevom razmeshchenii]. Technosphere security technologies. 2021. No. 3 (93). Pp. 208–225. (rus) doi:10.25257/TTS.2021.3.93.208-225.

17. Dianov D.V. Formation of a system of statistical indicators for the creation of primary real estate market objects [Formirovanie sistemy statisticheskikh pokazatelej sozdaniya ob"ektov pervichnogo

rynka nedvizhimosti]. Statistics and Economics. 2020. Vol. 17. No. 1. Pp. 14–24. (rus)

18. Viktorova T.N., Romanova T.G., Ivanova O.V., Shalginova E.Yu. Topical issues of ensuring the sanitary and epidemiological welfare of the population of the Republic of Khakassia during the liquidation of the consequences of an emergency situation in 2015 [Aktual'nye voprosy obespecheniya sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya respubliky hakasiya pri likvidacii posledstvij chrezvychajnoj situacii v 2015 g.]. Infection and immunity. 2017. No. S. S. 528. (rus)

19. Bakhtiyarova O.N., Malyshev E.V., Glotov E.N. Choosing the direction of evacuation of the population in case of an accident at a chemically hazardous facility taking into account prevailing wind directions [Vybor napravleniya evakuacii naseleniya v sluchae avarii na himicheski opasnom ob'ekte s uchetom preobladayushchih napravlenij vetra]. Scientific and educational problems of civil protection. 2018. No. 1 (36). Pp. 20–23. (rus)

20. Mammadov V.Sh., Gura E.A., Shcherbina Yu.G., Esakov A.O., Roslyakova O.V. Hygienic and anti-epidemic requirements and norms for the organization and functioning of temporary accommodation of evacuated population in peacetime emergencies [Gigienicheskie i protivoepidemicheskie trebovaniya i normy k organizacii i funkcionirovaniyu punktov vremennogo razmeshcheniya evakuirovannogo naseleniya v usloviyah chrezvychajnykh situacij mirnogo vremeni]. Bulletin of Hygiene and Epidemiology. 2021. Vol. 25. No. 1. Pp. 92–97. (rus)

21. Lubochkin R.V., Zavyalov D.E., Savenkova A.E. Regulatory legal framework of measures to ensure fire safety, protection from emergency situations [Normativnaya pravovaya baza meropriyatij po obespecheniyu pozharnoj bezopasnosti, zashchity ot chrezvychajnykh situacij]. Naukosfera. 2020. No. 10-2. Pp. 38–44. (rus)

22. Trofimov A.V. Fire and technical supervision in the field of fire safety during the deployment and operation of the PVR [Pozharno-tekhnicheskij nadzor v oblasti pozharnoj bezopasnosti pri razvertyvanii i ekspluatatsii PVR]. Collected papers of the International Scientific Conference "Civil Defense on guard of peace and security". Moscow, March 01, 2021. Moscow: Publishing House "Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia", 2021. Pp. 253–261. (rus)

23. Wenhui L., Hong Z., Qian W., Tianran H., Hong X., A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. Advances in Civil Engineering. Vol. 2021. 18 p. doi:10.1155/2021/8869315.

24. Grakhov V.P., Tolkachev Yu.A. Methodology for comparing options for pre-erected temporary

housing to accommodate the population affected by a natural disaster [Metodika sravneniya variantov bystrovovodimogo vremennogo zhil'ya dlya razmeshcheniya naseleniya, postradavshego v rezul'tate stihijnogo bedstviya]. CITISE. 2022. No. 2. Pp. 317–326. (rus) doi:10.15350/2409-7616.2022.2.27

25. Angarsky E.V., Piotrovich A.A. Innovative designs of prefabricated modular buildings for modern construction sites in the North of the Far East of the Russian Federation [Innovacionnye konstrukcii bystrovovodimyykh modul'nykh zdaniy dlya sovremennykh stroitel'nykh ploshchadok Severa Dal'nego Vostoka Rossijskoj Federacii]. Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century. 2017. Vol. 2. Pp. 8–13. (rus)

26. Zhukova L.G. Modular buildings [Modul'nye zdaniya]. Innovative science. 2017. No. 12. Pp. 211–215. (rus)

27. Presnov O.M., Babenkova A.I., Boyko V.N., Pozdnyakova E.A. Collapsible foundation for mobile homes [Sborny-razbornyj fundament dlya mobil'nykh domov]. Innovations and investments. 2022. No. 1. Pp. 174–179. (rus)

28. Alimpieva A.N., Kuzmicheva Yu.S., Kozikova I.N. Features of construction technology in the conditions of the North [Osobennosti tekhnologii stroitel'stva v usloviyah severa]. Collected papers of the Interuniversity Scientific Conference "New technologies in the educational process and production". Ryazan, April 17–19, 2018. Ryazan: Publishing House "Individual entrepreneur Zhukov Vitaly Yurievich", 2018. Pp. 314–318. (rus)

29. Kizimova O.V., Pronin V.E. Block-modular containers made of efficient steel profiles [Blok-modul'nye kontejnery iz effektivnykh stal'nykh profilej]. Collected papers of the Interuniversity Scientific Conference "WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS". Penza, August 30, 2018. Penza: Publishing House "Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.)", 2018. Pp. 40–43. (rus)

30. Li Zh., Zhu Ts., Bantserova O.L. Assessment of thermal comfort for workers on a construction site in a block-modular building made of sandwich panels [Ocenka teplovogo komforta dlya rabochih na strojplushchadke v blochno-modul'nom zdanii iz sendvich-panelej]. Industrial and civil construction. 2019. No. 2. Pp. 60–65. doi:10.33622/0869-7019.2019.02.60-65.

31. Gerasimov M.D., Ivanov V.I. Analysis of the modular structures market [Analiz rynka modul'nykh konstrukcij]. Collected papers of the Interuniversity Scientific Conference "Energy-saving technological complexes and equipment for production". Belgorod, 2018. Belgorod: Publishing House "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov", 2018. Pp. 123–126. (rus)

32. Pakhomova L.A., Oleinik P.P. Comfortable housing of the new industrial generation [Komfortnoe zhil'e novogo industrial'nogo pokoleniya]. Construction production. 2020. No. 2. Pp. 23–28. (rus) doi:10.54950/26585340_2020_2_23

33. Ghannad, P.; Lee, Y.-C.; Choi, J.O. Feasibility and implications of the modular construction approach for rapid post-disaster recovery. International Journal of Industrialized Construction. Vol. 1. 2020. Pp. 64–75.

34. Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Zorin M.V. Prospects for the use of plastic plates for the construction of temporary transport routes [Perspektivy ispol'zovaniya plastikovykh plit stroitel'stva vremennykh transportnykh putej]. Collected papers of the All-Russian Scientific Conference "Mechanical Engineering: new concepts and technologies". Krasnoyarsk, October 23, 2020. Krasnoyarsk: Publishing House "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2020. Pp. 98–103. (rus) doi:10.29173/ijic220

35. Leontiev V.A., Oleinik D.S., Yashchenko A.K., Salmina A.A. Heating of an individual residential house in the absence of a centralized gas supply system [Otoplenie individual'nogo zhilogo doma v usloviyakh otsutstviya sistemy centralizovannogo gazosnabzheniya]. Education and science in the modern world. Innovation. 2021. No. 2 (33). Pp. 149–155. (rus)

36. Sotnikova O.A., Dontsov A.V. Advantages of block-modular boiler houses [Dostoinstva

blochno-modul'nykh kotel'nykh]. High technologies in the construction complex. 2018. No. 2. Pp. 36–40. (rus)

37. Ippolitov V.A., Patera A.E., Kryukov O.V. Prospects for the construction of facilities of oriented power plants for new energy projects [Perspektivy stroitel'stva ob'ektov orientirovannykh elektrostanciy dlya novykh energeticheskikh proektov]. Chief Power Engineer. 2021. No. 7. Pp. 10–23. (rus)

38. Skolubovich Yu.L., Voitov E.L., Tsyba A.A., Balchugov D.V., Monakhov D.N. Preparation of surface and underground waters for drinking water supply of settlements in the Arctic zone [Podgotovka poverhnostnykh i podzemnykh vod dlya pit'evogo vodosnabzheniya poselkov v Arkticheskoy zone]. Academia. Architecture and construction. 2020. No. 3. Pp. 138–142. (rus)

39. Kyneva A.I., Pavlov S.Ya. The water treatment system of a modular hotel in the Republic of Sakha (Yakutia) [Sistema vodoochistki modul'noj gostinicy v respublike Saha (Yakutiya)]. Collected papers of the Interuniversity Scientific Conference "SPbPU Science Week". St. Petersburg, November 19–24, 2018. Publishing House "POLYTECH-PRESS", 2018. Pp. 181–183. (rus) doi:10.22337/2077-9038-2020-3-138-142

40. Filippov I.V., Lopanitsyna E.S. Production and construction of modular buildings from block containers. Technical presentation. [Proizvodstvo i stroitel'stvo modul'nykh zdaniy iz blok-konteynerov. Tekhnicheskoe predstavlenie]. Diary of Science. 2019. No. 4 (28). P. 70. (rus)

Information about the authors

Grakhov, Valery P. DSc of Economics, Professor. E-mail: pgs@istu.ru. Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 426069, Izhevsk, Student st., 7.

Tolkachev, Yuri A. Master's student of the Faculty of Civil Engineering. E-mail: ukushen13@gmail.com. Kalashnikov Izhevsk State Technical University Russia. 426069, Izhevsk, Student st., 7.

Received 04.06.2022

Для цитирования:

Грахов В.П., Толкачев Ю.А. Перспективы применения модульного строительства при организации пунктов временного размещения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 49–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-49-63

For citation:

Grakhov V.P., Tolkachev Yu.A. Prospects for the use of modular construction in the organization of temporary accommodation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 49–63. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-49-63

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-64-76

***Василенко Н.А., Коренькова Г.В., Земскова А.О.**

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

*E-mail: nvasilenko_domik@mail.ru

СТИЛЕВОЙ И ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ПРИМЕРЕ ХРАМА ПОЧАЕВСКОЙ ИКОНЫ БОЖИЕЙ МАТЕРИ В Г. БЕЛГОРОДЕ

Аннотация. Решение задач объемно-пространственного анализа формы архитектурного объекта, закономерностей его построения (пропорционального, метроритмического, стилового характера) является важной составляющей предпроектных исследований при реконструкции храмов. Данная статья посвящена вопросам объемно-пространственного стилового и пропорционального архитектурного анализа реконструируемого храма Почаевской иконы Божией Матери в г. Белгороде. Рассмотрены особенности стиловой принадлежности храма, исходя из характерных стилизованных направлений в русском православном храмостроительстве периода конца XX – начала XXI веков, предопределившие направление объемно-пластического и конструктивного решения проектного предложения по реконструкции. Проведена попытка прочтения пропорций и размеров храма до и после реконструкции на основе методики пропорционального анализа с выявлением пропорциональных зависимостей с помощью золотого сечения, метода триангуляции, ряда Фибоначчи, восстановленных диагоналей и перпендикуляров, динамических прямоугольников Джесса Хэмбиджа с соотношением сторон $1 : \sqrt{2}$ и $1 : \sqrt{3}$.

Стилевой и пропорциональный архитектурный анализ храма послужил основой для архитектурно-конструктивного формообразования в процессе реконструкции, определения характерных линий и точек вновь возводимых форм, а также обоснования выбора конструктивных решений с применением железобетонных колонн, сводов, арок и арочных перемычек с учетом преобладания новаторской составляющей в архитектуре храма.

Ключевые слова: православный храм, реконструкция, стиль, архитектурный анализ, метод пропорционирования, архитектурный канон, архитектурная форма, архитектурно-конструктивное формообразование.

Введение. При разработке проекта реконструкции православного приходского храма, построенного в начале 2000-х годов и имеющего определенную социальную, архитектурно-градостроительную и духовную значимость в структуре крупного российского города, необходимо решение ряда вопросов, связанных с определением стилистической принадлежности архитектурного объекта, концептуальной идеи будущего проекта, выбора направления функционально-технологических, конструктивных и ряда других решений.

Вопросы объемно-пространственного анализа формы проектируемого или существующего объекта затрагивают закономерности построения архитектурных форм объекта (пропорционального, метроритмического, стилового характера, а также средств достижения образной выразительности) и связано с проблемой оценки эстетического в архитектуре.

Целью объемно-пространственного анализа формы проектируемого и существующего объекта в результате сбора информации является: определение проблемы, установление концепции проектирования архитектурного объекта, закономерностей его построения, особенностей архитектурно-конструктивного формообразования.

Определение архитектурного стиля объекта является одной из важнейших составляющих предпроектных исследований и преследует своей целью уточнение и наиболее полное раскрытие задач реконструкции, выявление специфики объемно-пластической моделировки архитектурных форм и выбора образца для проектной деятельности.

Проблемам интерпретации стиля, соотношения исторических и современных архитектурных форм в современной храмовой архитектуре России, закономерностям проектирования храмовых комплексов посвящены исследования Белкина А.Н., Лайтарь Н.В., Щенкова А.С. [1–3] и других. Вопросам поиска современного архитектурного решения образа православного храма на основе конкурсного проектирования посвящены публикации Кеслера М.Ю., Соловьева А.К., Соловьева К.А., Петрова-Спиридонова Н.А. [4–6] и других.

Аспектам архитектурно-композиционной символики, приемам поддержания средствами архитектуры символики духовного содержания храмовых христианских комплексов посвящены теоретические исследования Бондаренко И.А., Борисова С.В., Бусевой-Давыдовой И.Л. [8–11] и других; особенностям создания сакральных про-

странств в архитектуре, их корреляции с появлением семантики света как духовной, религиозной категории в православном миропонимании посвящено исследование [12].

Вопросам формирования «архитектурного канона» композиции современного православного храма, историческим особенностям строительства храмов в нашей стране посвящены исследования [2, 13, 14]; сохранению традиций русского православного храмостроения при восстановлении и строительстве современных православных храмов посвящен ряд работ [15, 16]. Вопросы применения типовых объемно-планировочных элементов при проектировании современных приходских храмов затронуты в работе [17].

В настоящее время нормативными документами, призванными помочь архитекторам в проектировании храмов, являются пособия по проектированию и строительству «Православные храмы» в трех томах (автор-составитель – главный специалист АХЦ «Арххрам» М.Ю. Кеслер) [18-20] и Свод правил «Храмы православные. Правила проектирования» [21].

Вопросам классификации современных приходских храмов, теоретическим моделям формирования типологии православных приходских храмовых комплексов (социальные, функциональные и типологические аспекты), посвящены исследования Ивиной М.С. [22, 23].

Методам пропорционального анализа культовых сооружений, вопросам архитектурной логики их формообразования посвящены исследования ряда авторов: Афанасьева К.Н., Григоренко Г.Ф., Радзюкевич А.В., Пищулиной В.В., Шевелева И.Ш., Марутаева М.А., Шмелева И.П. [24-29] и ряда других.

Обзор выше указанной литературы позволяет говорить о применяемом разнообразии стиливых прототипов при одновременном стремлении к сохранению традиций в русском православном храмостроении России на рубеже XX–XXI вв., что требует предпроектного анализа при формировании концептуальной идеи реконструируемого объекта в конкретных градостроительных условиях.

Материалы и методы. Объектом данного исследования является реконструируемый храм Почаевской Иконы Божией Матери в г. Белгороде.

Предмет исследования: методы и приемы объемно-пространственного стиливого и пропорционального архитектурного анализа объектов реконструкции на примере русского православного храмостроительства периода конца XX–начала XXI века.

Цель исследования: проведение предпроектных исследований, направленных как на архитектурно-композиционный поиск пропорций и пластики реконструируемого храма с учетом объемно-пластического стиливого и пропорционального анализа существующего и пристроенных объемов, так и выбор конструктивных решений в проекте реконструкции.

Задачи исследования:

- выявление объемно-пластической стиливой принадлежности существующего храма с целью сохранения его архитектурной стилистики в процессе реконструкции;
- проведение поиска объемно-пластической составляющей архитектурного облика реконструируемого храма на основе методов архитектурного пропорционирования;
- разработка и обоснование проектных предложений по реконструкции храма на основе выбранного направления реконструктивных работ.

Основная часть. В настоящее время в городе Белгороде действует немногим более двадцати христианских храмов, восемь из которых являются уникальными памятниками архитектуры. Более двенадцати храмов были построены в конце 1990-х–начале 2000-х годов, во внешнем облике которых зодчие стремились выразить архитектурную идею христианского храма современным языком, отвечая при этом каноническим требованиям.

Строительство нового каменного храма в честь иконы Божией Матери «Почаевская» по бульвару Юности в г. Белгороде было завершено в 2012 году (рис. 1). Пятикупольный четырехстолпный одноапсидный каменный храм рассчитан на 450 прихожан. Главный престол храма посвящен иконе Божией Матери «Почаевская», приставной престол – святителю Спиридону, епископу Тримифунтскому. Храм расположен на участке площадью 0,16 га и окружен сквером с размерами в плане 111,7×75,0 м общей площадью 0,84 га.

За время существования храма Почаевской иконы Божией Матери с 2012 года стала ясной значительная востребованность храма, расположенного в структуре общественного центра самого плотно населенного района Харьковской горы города Белгорода, где проживает существенное число молодых семей. В настоящий период здание храма нуждается в расширении существующих площадей первого и цокольного этажей с целью размещения внутри храмового пространства баптистерия – крещальни и помещений иконно-книжной лавки. Изначально иконная лавка расположена в небольшом помещении притвора. Пристройка

объемов возможна с учетом отсутствия проектных ограничений и размещения участка в структуре территорий общего пользования [30].

При проектировании современных православных храмов на территории России архитекторы используют разные стилевые прототипы. Архитектурный стиль (от лат. *stilus, stylus*, от греч. *stylus, στύλος* – остроконечная палочка для письма; манера письма, способ изложения) – художественная категория, отражающая характерные черты, проявляющиеся в методах формообразования, творческого мышления архитектора,

приёмах композиции, функциональной, конструктивной и художественно-эстетической сторон. Архитектурный стиль «... обозначает ту общность архитектурных форм и приемов композиции, которая складывается в процессе исторического развития и отражает характер социальных задач, материально-технических возможностей и эстетических идеалов общества» [31]. Архитектурный стиль выступает средством практики, определенных предписаний и указаний для проектировщика.

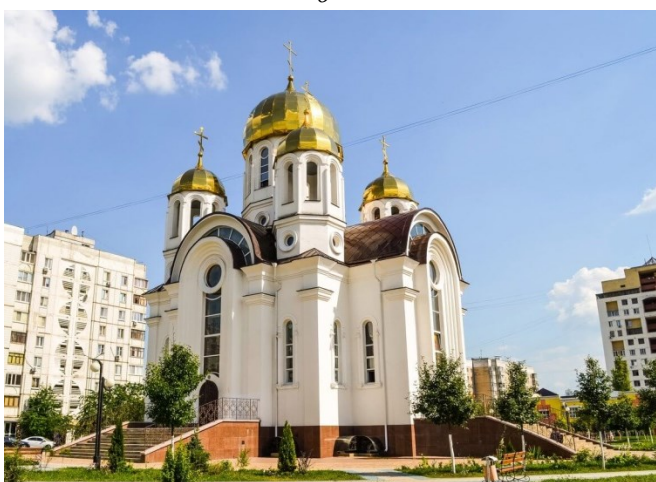
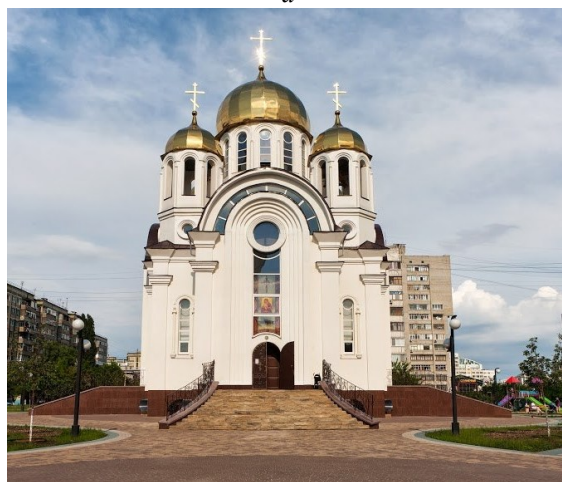


Рис. 1. Фото храма до реконструкции:

а – вид со стороны главного входа (западный фасад); *б* – вид с северо-западной стороны

Авторы научного исследования [3] в современном церковном зодчестве России на рубеже XX–XXI вв. выделяют следующие стилевые направления: «второй русско-византийский стиль», «второй русский стиль», «второй неорусский стиль», «обновленный неорусский стиль», «второй византийский стиль», современное классицизирующее направление, «второе необарокко», «вторая эклектика». При этом современные храмы, спроектированные в одном стиле, могут иметь разную степень соотношения традиционной и новаторской составляющей.

Преобладание во внешнем облике наиболее точно переданных архитектурных форм и декоративного убранства, характерных для исторических прототипов в церковном зодчестве определенного периода, отражает доминирование традиционной составляющей. Проявление и преобладание новаторской составляющей в проектом решении того или иного храма выражается в облегчении и стилизации декора, увеличении площади остекленных поверхностей фасадов, большей сдержанности и лаконичности внешнего облика, применении железобетонных, металлических конструкций и их отображении в архитектурном облике сооружения [3].

На основе сопоставительного анализа применяемых в православном храмостроительстве России стилевых прототипов периода конца XX – начала XXI веков выявлена стилевая принадлежность храма Почаевской иконы Божией Матери к неовизантийскому или так называемому «второму византийскому стилю», имеющему преобладание новаторской составляющей (применение железобетонных конструкций, большая площадь остекления на поверхностях фасадов, лаконичность и стилизация декора во внешнем облике храма).

Авторами исследования проведена попытка прочтения пропорций и размеров храма с применением методов пропорционального анализа. Анализ объекта методами архитектурного пропорционирования выполнен графоаналитическим способом с выявлением узловых точек и закономерностей построения структуры фасадов и планов храма. Пропорции способствуют раскрытию функционального и идейного содержания архитектурного объекта и придают храму композиционную законченность, завершенность.

Совмещенные схемы фрагмента фасада Е-А и плана первого этажа до реконструкции с выявлением пропорциональных зависимостей представлены на рисунках 2–3, после реконструкции

– на рисунках 4–5. В результате использования графоаналитических методов пропорционирования на основе динамических прямоугольников Джея Хэмбиджа, пропорций золотого сечения,

ряда Фибоначчи, метода триангуляции, восстановленных диагоналей и перпендикуляров выявлен ряд пропорциональных закономерностей в построении плана и фасада здания до и после реконструкции.

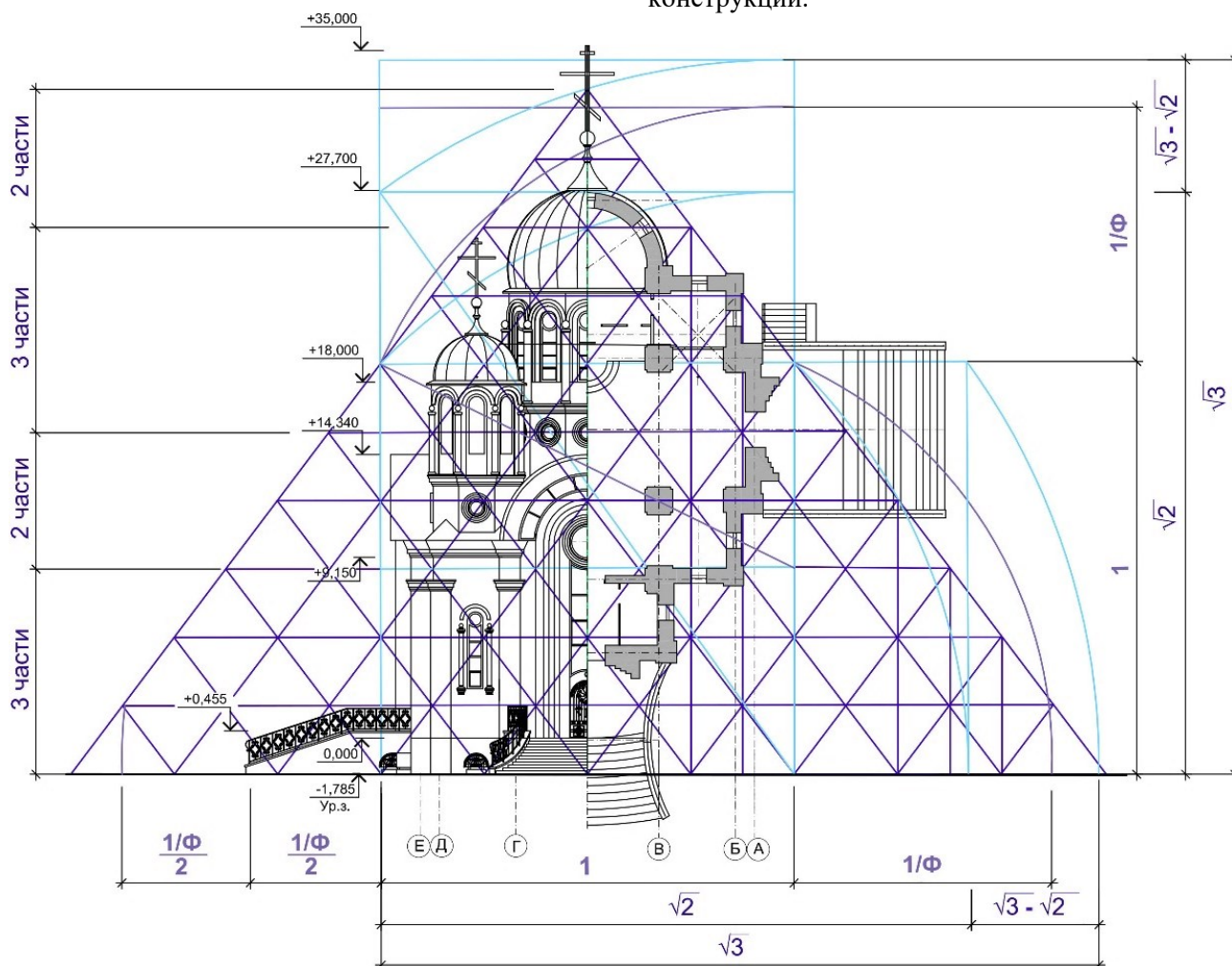


Рис. 2. Совмещенная схема фрагмента фасада Е-А и плана первого этажа до реконструкции с выявлением пропорциональных зависимостей с помощью золотого сечения, метода триангуляции и динамических прямоугольников Джея Хэмбиджа с соотношением сторон $1 : \sqrt{2}$ и $1 : \sqrt{3}$

Выявление аналогий в построении пропорций плана и фасада здания до реконструкции храма позволило графически определить целый ряд закономерностей:

- высота от уровня чистого пола храма до верхней отметки большого купола храма равна длине храма от края входного крыльца до наружной грани стен алтаря и составляет 27,7 м;
- диаметр большого купола соответствует диаметру алтарной части в плане и равен 7,2 м (в осях);
- применение метода триангуляции позволяет зафиксировать характерные узловые точки на фасаде и плане первого этажа храма, соответствующие элементам пластики и композиционным осям на плане, линиям пилястр, оконных проемов, оснований венчающих крестов на фасаде;

- метод триангуляции находит отклик в пропорциях золотого сечения (соотношения $1 : 1/\Phi$; $1/\Phi : 2$) как по вертикали, так и по горизонтали;
- построение динамических прямоугольников Джея Хэмбиджа с соотношением сторон $1 : \sqrt{2}$ и $1 : \sqrt{3}$ на основе принятой за единицу суммы высот шести рядов равносторонних треугольников находит отклик в верхней отметке большого купола храма, центре венчающего большого креста;
- спираль Фибоначчи из квадратов со сторонами 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13 (1 принята равной 690 мм) композиционно связана с шириной входного портала храма, отметкой низа широкого карниза, отметкой верха арки входного портала и находит отражение в построении элементов крылец и ступеней главного и боковых входов;

– метод восстановленных диагоналей и перпендикуляров фиксирует взаимосвязь спирали Фибоначчи из квадратов с отдельными узловыми точками фасада и плана храма: низа окон

малого барабана, контура стен и ступеней на плане.

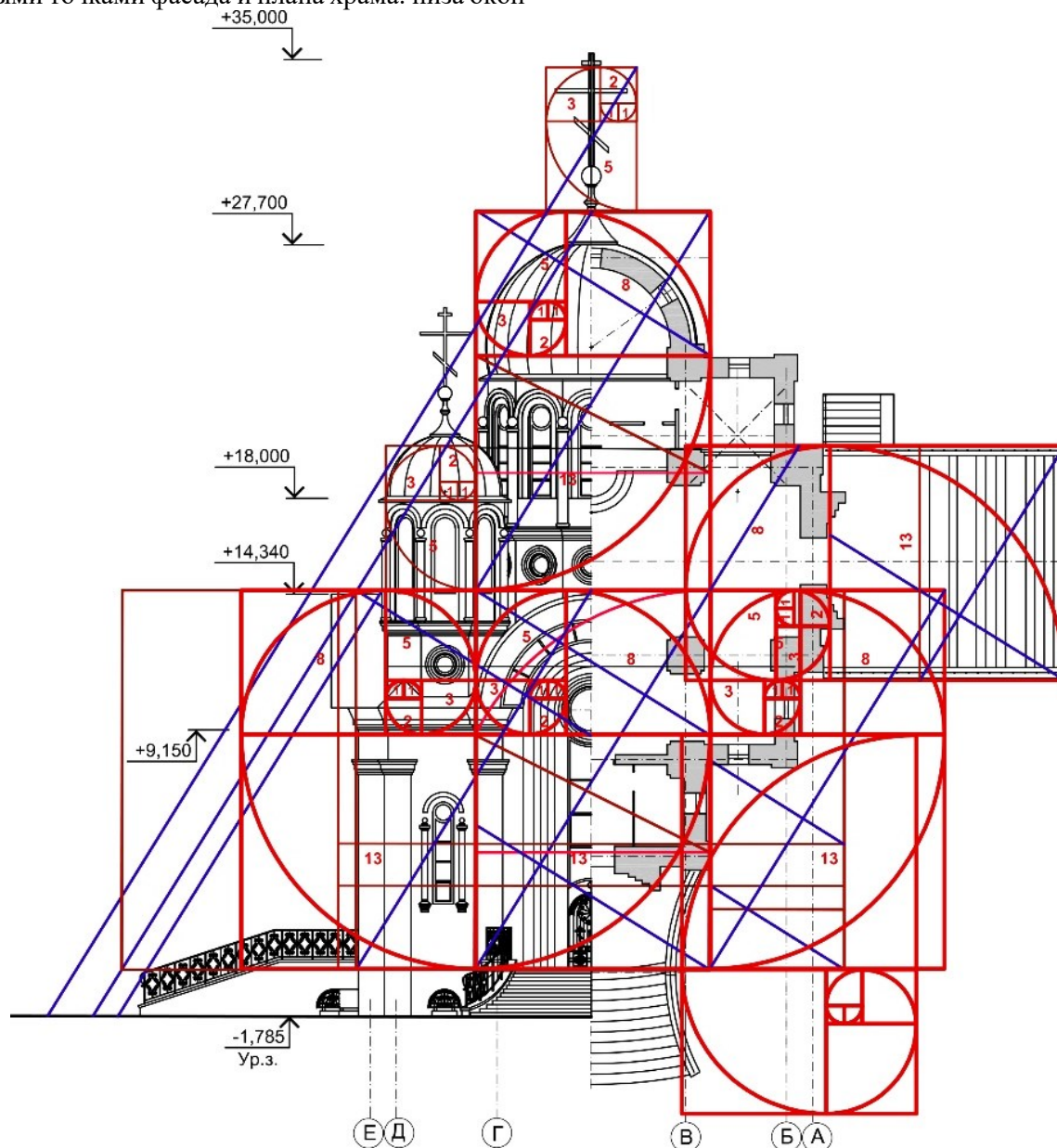


Рис. 3. Совмещенная схема фрагмента фасада Е-А и плана первого этажа до реконструкции с выявлением пропорциональных зависимостей с помощью ряда Фибоначчи и восстановленных диагоналей и перпендикуляров

Проведенное нами детальное измерение форм храма Почаевской иконы Божией Матери в г. Белгороде дало возможность обнаружить тождественные пропорциональные закономерности в построении центрального и малых барабанов с венчающими куполами. Ширина большого барабана храма по внешнему контуру стен составляет 7,9 м; малого – 4,38 м. Диаметр главного купола составляет 7,2 м (в осях) и 7,11 м по внутреннему контуру; диаметр малого купола составляет 3,9 м (в осях) и 3,6 м по внутреннему контуру.

Проектом реконструкции предложена пристройка одноэтажных симметричных объемов с южной, северной и западной сторон. Пристраиваемые с северной и южной сторон объемы предусмотрены для крещален и имеют размеры в осях 7,2×7,2 м; объем с западной стороны предусмотрен для иконно-книжной лавки, проведения таинства исповеди и имеет размеры в осях 7,2×6,6 м. Очертания контуров входных крылец и ступеней сохранены и примыкают к пристроенным объемам.

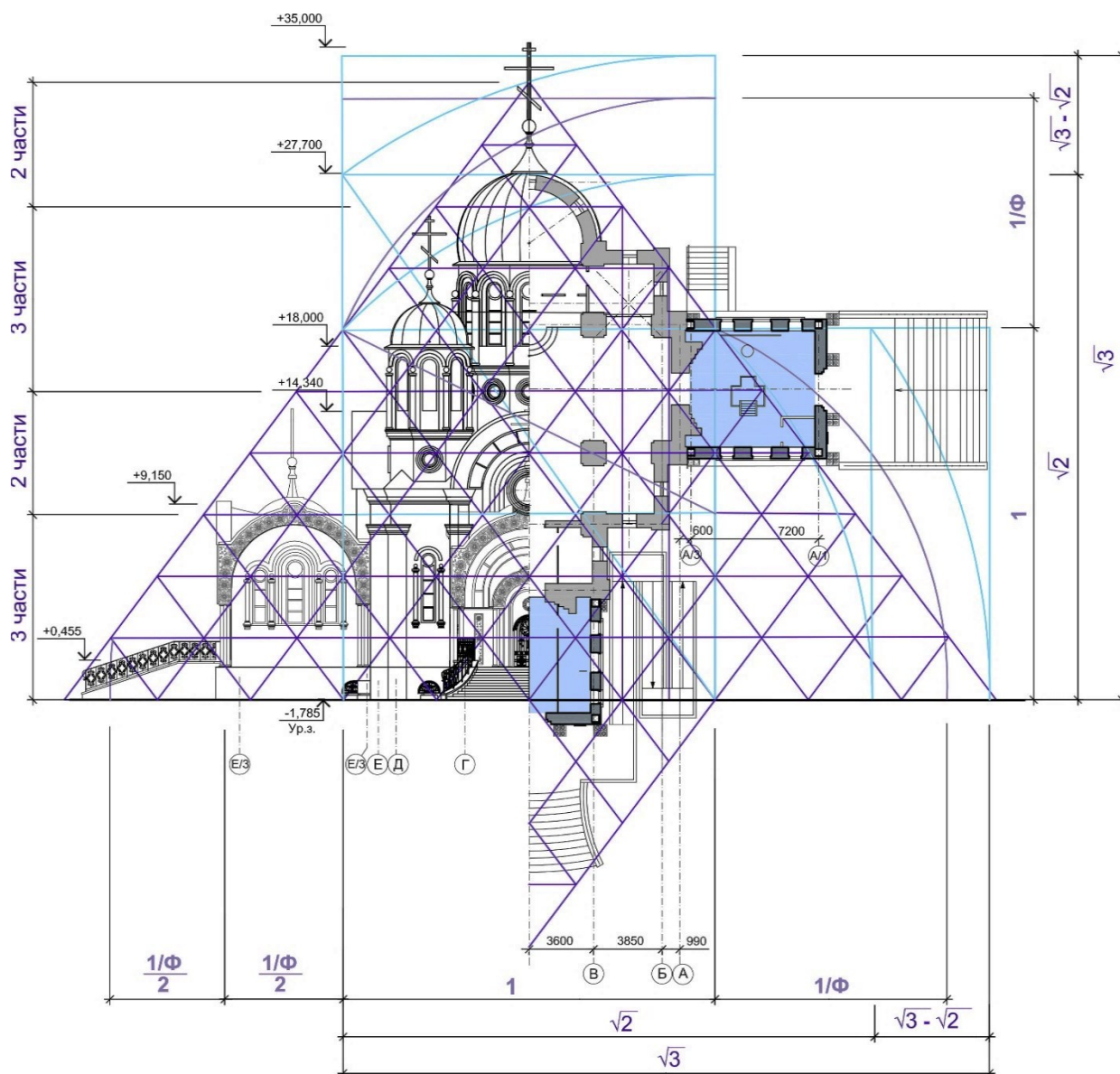


Рис. 4. Совмещенная схема фрагмента фасада Е/3–А и плана первого этажа после реконструкции с выявлением пропорциональных зависимостей с помощью золотого сечения, метода триангуляции и динамических прямоугольников Джея Хэмбиджа с соотношением сторон $1 : \sqrt{2}$ и $1 : \sqrt{3}$

Выявленный ряд пропорциональных зависимостей на схемах фрагмента фасада и плана храма до реконструкции послужил основой для построения пластики вновь возводимых форм после реконструкции. Пропорциональная система отношений создает соразмерность, гармоническую согласованность частей и форм сооружения.

На совмещенных схемах фрагмента фасада Е/3–А и плана первого этажа храма после реконструкции с помощью графоаналитических методов пропорционирования на основе динамических прямоугольников Джея Хэмбиджа, пропорций золотого сечения, ряда Фибоначчи, метода триангуляции, восстановленных диагоналей и перпендикуляров выявлен ряд пропорциональных закономерностей:

- граница линий равнобедренных треугольников по методу триангуляции фиксирует высотные отметки выступающих элементов – верха арки, верхней отметки венчающего креста вновь возводимого объема;
- узловые точки орнаментации вновь возводимых объемов на фасаде (очертание и пропорции оконных проемов, размещение вертикальных осей (ритмическая партитура)) ориентированы на узловые точки равнобедренных треугольников по методу триангуляции;
- узловые точки построения элементов плана и крылец пристраиваемых объемов находят зависимость с контурами линий по методу триангуляции и динамическими прямоугольниками Джея Хэмбиджа с соотношением сторон $1 : \sqrt{2}$ и $1 : \sqrt{3}$;

– спираль Фибоначчи из квадратов со сторонами 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13 находит отражение в построении элементов крылец и ступеней главного и боковых входов вновь возводимых объемов;

– метод восстановленных диагоналей и перпендикуляров фиксирует касательную к верхним отметкам существующего и вновь возводимых объемов и находит отклик в построении контура стен и ступеней на плане.

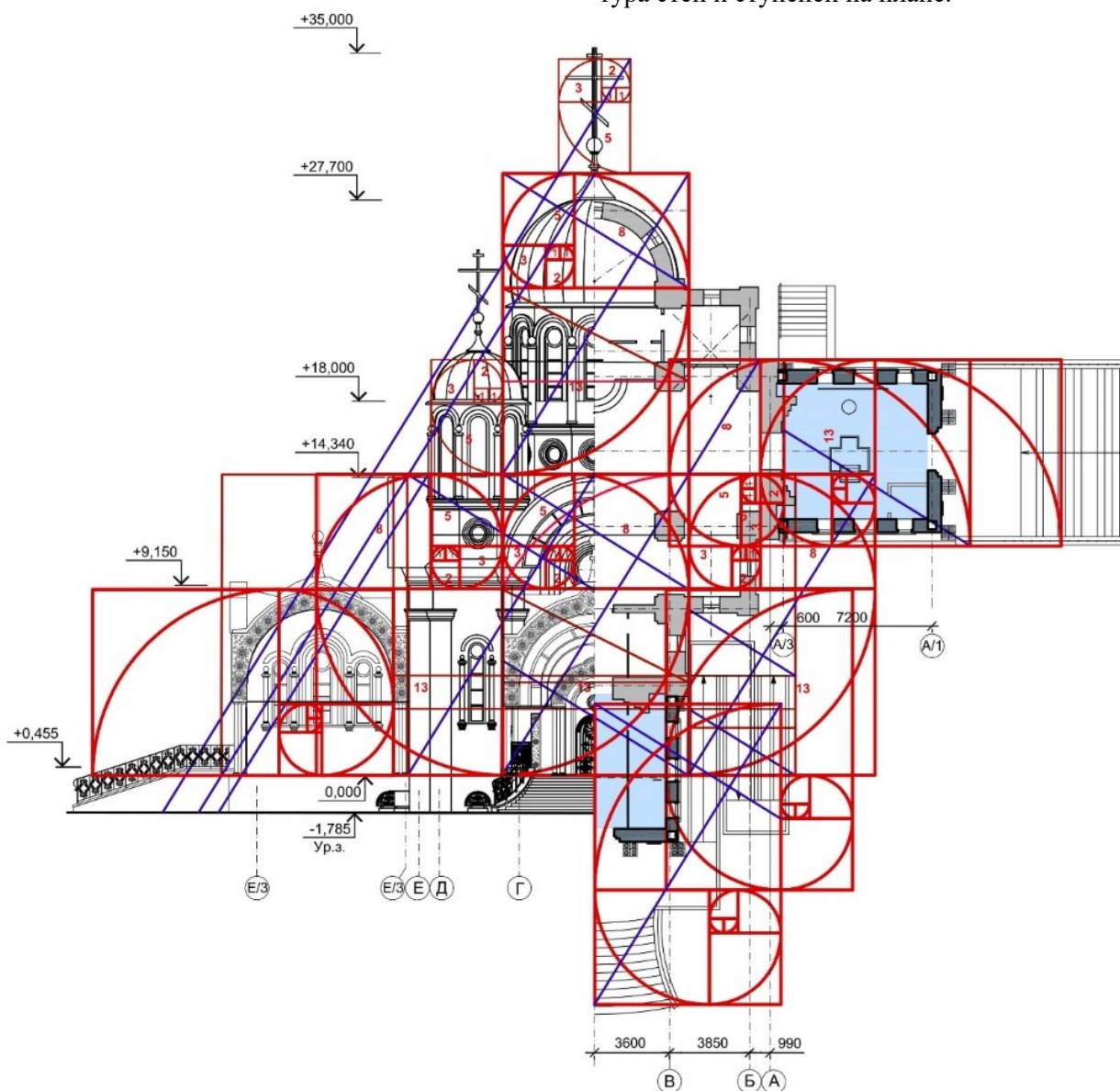


Рис. 5. Совмещенная схема фрагмента фасада Е/3-А и плана первого этажа после реконструкции с выявлением пропорциональных зависимостей с помощью ряда Фибоначчи и восстановленных диагоналей и перпендикуляров

На рисунке 6 приведены перспективные виды проектного предложения по реконструкции храма. Строго симметричное решение фасадов вновь возводимых объемов и их элементов продиктовано существующими осями и плоскостями симметрии. Приставные спаренные колонны круглого сечения объединены наверху полукруглыми закомарами, повторяющими внутренние своды. В отделку пристроенных объемов внесен художественный декор в членения карнизов, в заполнение арочного обрамления стен белокаменными рельефами, что придает живописность строго симметричной композиции фасадов.

Входы решены в виде перспективных порталов, декорированных колоннами с капителями, на которые опираются заполненные рельефным орнаментом закомары. Оконные проемы украшены фигурными наличниками с завершениями в виде кокошников. В рисунке настенного декора применен крестообразный мотив растительного орнамента. Исполнение декоративных элементов фасадов может выполняться из искусственного камня или более легкого по массе материала – пенополистирола.



Рис. 6. Перспективные виды храма после реконструкции (проектное предложение)

Выбор конструктивных решений пристраиваемых объемов продиктован новаторской составляющей в архитектурном стиле существующего храма и отражен в применении железобетонных конструкций фундаментов, перекрытий, венчающих куполов, входных арок порталов и перемычек, что обосновывает применение во вновь возводимых объемах железобетонных колонн и пространственных конструкций покрытия – сводов.

В соответствии с православной традицией при возведении храмов предпочтение отдают строительным материалам, имеющим в своей основе природное происхождение и особое богословское обоснование, – дереву, камню и кирпичу [19]. В связи с этим наружные стены вновь возводимых объемов общей толщиной 640 мм приняты трехслойные с учетом выполнения условий энергосбережения. Конструкционный слой наружных стен – кладка из силикатного кирпича толщиной 380 мм; утеплитель – минераловатный материал ISOROC ИЗОБЕНТ-Н, толщиной 100 мм; ограждающий слой – кладка из силикатного кирпича, толщиной 120 мм.

Перекрытие цокольного этажа – монолитное, толщиной 200 мм, класс бетона В25. Покрытие пристраиваемых двух квадратных и одного

прямоугольного в плане помещений – монолитный железобетонный крестовый свод, опирающийся на железобетонные колонны. Своды с размерами в плане 7,2×7,2 м и 7,2×6,6 м, с высотой стрелы подъема 1,8 м, класс бетона В25. Железобетонные колонны приняты сечением 400×400 мм, класс бетона В25. Фундаменты монолитные железобетонные под колонны, размерами в плане 1,2×1,2 м, бетон класса В25. На рисунке 7 приведены перспективные виды элементов конструкций покрытия и фундаментов, пристраиваемых в процессе реконструкции.

Выводы.

1. На основе проведенных предпроектных исследований по храму Почаевской иконы Божией Матери в г. Белгороде выявлено, что проявление и преобладание новаторской составляющей в архитектурно-конструктивном решении существующего храма выражено в облегчении и стилизации внешнего декора, в увеличенной площади остекленных поверхностей фасадов, сдержанности и лаконичности внешнего облика, а также применении железобетонных конструкций перекрытий, покрытий (куполов), арочных перемычек, отделке архитектурным рельефным декором из пенополистирола.

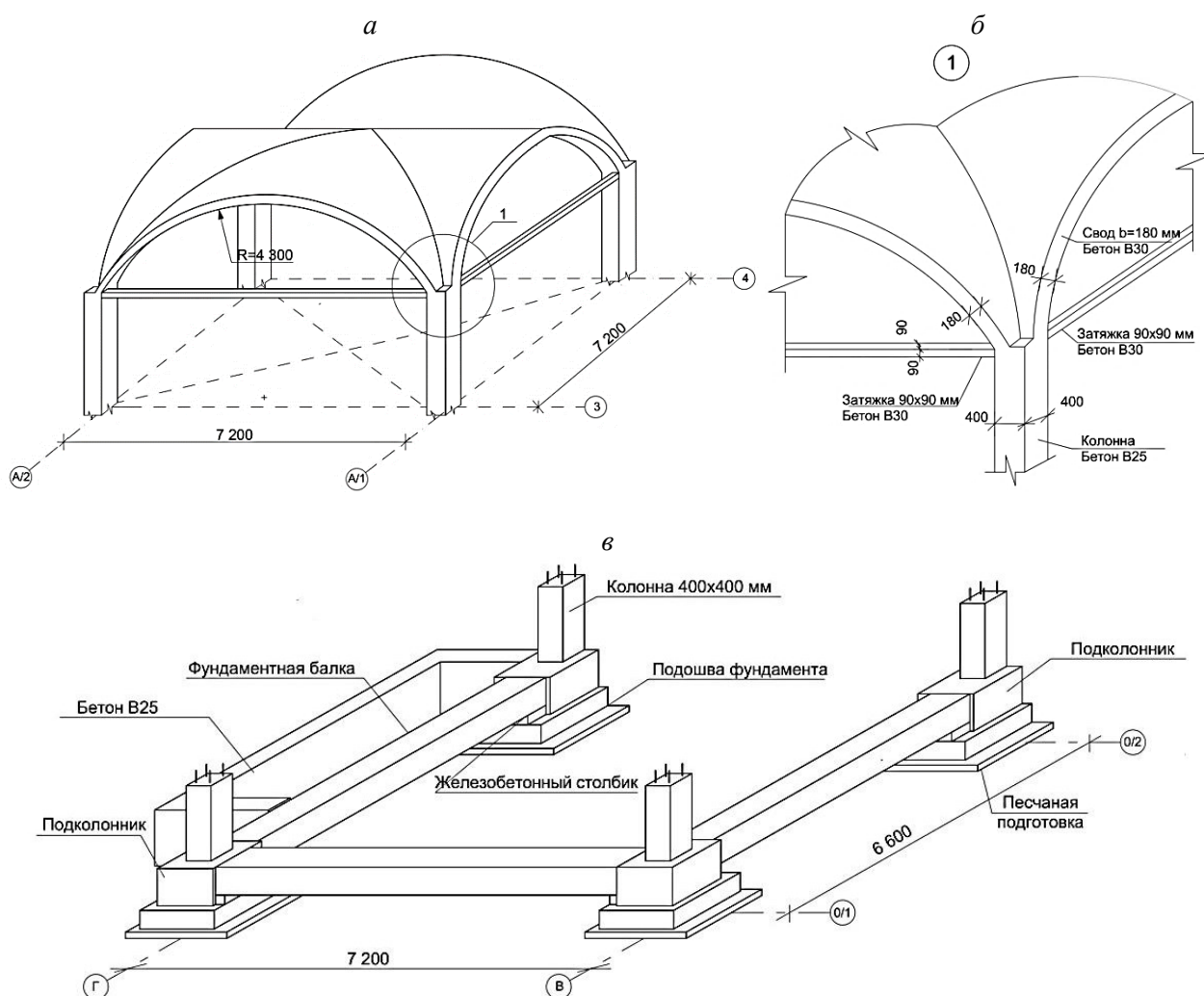


Рис. 7. Перспективные виды элементов конструкций (проектное предложение):
 а – общий вид монолитного железобетонного свода; б – наружный узел стыка арок свода и колонны;
 в – общий вид фундамента

2. В результате использования методов пропорционирования на основе динамических прямоугольников Джея Хембиджа, пропорций золотого сечения, ряда Фибоначчи, метода триангуляции, восстановленных диагоналей и перпендикуляров выявлен ряд пропорциональных закономерностей в построении плана и фасада здания до реконструкции, что позволило уточнить соизмерность, пропорциональность всего сооружения и его частей.

3. Графоаналитические методы пропорционирования, применяемые в анализе закономерностей построения планов и фасадов здания до реконструкции, послужили основой для архитектурно-конструктивного формообразования пристраиваемых объемов. Ряд выявленных закономерностей позволил определить вертикальные отметки формообразующих элементов, взаимосвязь в расположении композиционных осей, основных членений фасадов и планов вновь возводимых форм.

4. Стилиевой анализ послужил основой для определения конструктивного решения вновь

возводимых объемов в проекте реконструкции и обоснования пространственного решения покрытия – железобетонных сводов, опирающихся на колонны, а также применения железобетонных арок над входами и арочных перемычек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белкин А.Н. История и современность в архитектуре православного храма // Научное обозрение, 2015. № 8. С. 164–167.
2. Щенков А.С. Архитектура русского православного храма. Москва: Памятники исторической мысли, 2013. 528 с.
3. Лайтарь Н.В. Проблема стиля в современной храмовой архитектуре России // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2008. № 77. С. 120–126.
4. Кеслер М.Ю. Размышления над итогами конкурса на современное архитектурное решение образа православного храма // Официальный сайт Михаил Кеслер архитектор. Рубрика «Статьи». 2013. 14 декабря. URL: <http://kesler.ortox.ru/2013/12/14/razmyshlenie-nad-itogami>

konkurs-na-sovremennoe-arhitekturnoe-reshenie-obraza-pravoslavnogo-hrama/ (дата обращения: 12.06.2022)

5. Петров-Спиридонов Н.А. Генезис архитектурных типов православных храмов в современности и грань между поиском и «архитектурой изгнанных смыслов» // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. №1(50). С. 23–46. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15002.

6. Соловьев А.К., Соловьев КА. Современная культовая архитектура и актуальные проблемы церковного искусства // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2017. № 1 (38). С. 225–242.

7. Бондаренко И.А. К вопросу о символике церковной главы // *Архитектурное наследие*, 2019. № 70. С. 5–15.

8. Бондаренко И.А. Образ геоцентрической Вселенной в традиционном зодчестве // *Теория в истории архитектуры и градостроительства: публикации разных лет / Российская академия архитектуры и строительных наук, НИИТИАГ [Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»]*. Санкт-Петербург: Коло, 2017. С. 247–261.

9. Бондаренко И.А. О двух подходах к структурированию пространства в древнерусской архитектурной традиции // *Архитектурное наследие*. 2021. № 75. С. 5–13.

10. Бусева-Давыдова И.Л. Представления о символике храма в культуре Древней Руси (по письменным источникам) // *Архитектурное наследие*. 2001. Вып. 44. С. 3–16.

11. Борисов С.В., Зверкова В.В. Архитектурно-композиционная символика и принципы проектирования храмовых комплексов в условиях горного рельефа // *Архитектон: известия вузов*. 2021. № 3 (75). doi: 10.47055/1990-4126-2021-3(75)-3.

12. Петров-Спиридонов Н.А. Семантика «тварного» и «нетварного» света в русском церковном зодчестве // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021. №3(56). С. 195–213. doi: 10.24412/1998-4839-2021-3- 195-213.

13. Верховых Е.Ю. Принципы формирования «архитектурного канона» композиции православного храма // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2019. № 2. С. 71–75. doi: 10.25628/UNIP.2019.41.2.013

14. Канонические требования храмоостроительного искусства [Электронный ресурс]. Систем. требования: URL: <http://www.golddomes.ru/cerkov> (дата обращения 13.05.2022).

15. Черныш Н.Д., Коренькова Г.В. Проблемы сохранения культурного наследия при восстановлении и строительстве православных

храмов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. 140 с.

16. Коренькова Г.В., Черныш Н.Д., Митякина Н.А. Приверженность традициям русского православного храмоостроения при формировании специальных знаний будущих проектировщиков // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2016. №. 6. С. 105–108.

17. Борисов С.В. Применение типовых объемно-планировочных элементов при проектировании современных приходских храмов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2011. № 2 (15).

18. Православные храмы. В трех томах. Том 1. Идея и образ: Пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99). МДС 31-9.2003/ АХЦ «Арххрам». Москва: ГУП ЦПП, 2004. 339 с.

19. Православные храмы. В трех томах. Том 2. Православные храмы и комплексы: Пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99). МДС 31-9.2003/ АХЦ «Арххрам». Москва: ГУП ЦПП, 2003. 222 с.

20. Православные храмы. В трех томах. Том 3. Примеры архитектурно строительных решений: Пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99). МДС 31-9.2003/ АХЦ «Арххрам». Москва: ГУП ЦПП, 2005. 204 с.

21. СП 391.1325800.2017 Храмы православные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2018. 38 с.

22. Ивина М.С. Теоретические модели формирования типологии православных приходских храмовых комплексов в условиях Санкт-Петербурга // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 4 (57). С. 19–27.

23. Ивина М.С. Развитие типологии современных православных приходских храмовых комплексов (на примере Санкт-Петербурга) // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 4(51). С. 14–18.

24. Афанасьев К.Н. Построение архитектурной формы древнерусскими зодчими [Переизд.]. Москва: Ладомир, 2002. 269 с.

25. Григоренко Г.Ф., Радзюкевич А.В. Математические аспекты архитектурной логики формообразования римского Пантеона // *Schole. Философское антиковедение и классическая традиция*. 2020. Вып.1. Т.14. doi: 10.25205/1995-4328-2020-14-1-226-245. AdobeAcrobatReader. Режим доступа: <https://readera.org/147215864> (дата обращения 14.06.2022).

26. Радзюкевич А.В. Пропорционально-метрологические и геометрические особенности формообразования римского Пантеона / В кн.: *Архитектурное формообразование и геометрия*. Москва: ЛЕНАНД, 2010. С. 183–194.

27. Пищулина В.В. К вопросу о модулях построения плана христианского храма на Северном Кавказе и в Северном Причерноморье X–XII веков // В кн.: Архитектурное формообразование и геометрия. Москва: ЛЕНАНД, 2010. С. 161–182.

28. Пищулина В.В. Христианское храмовое зодчество Северного Кавказа VI–XVI вв. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2012. 374 с.

29. Шевелев И.Ш., Марутаев М.А., Шмелев И.П. Золотое сечение. Три взгляда на природу гармонии. Москва: Стройиздат, 1990. 343 с.

30. Даниленко Е.П., Кононов А.А., Спесивов Б.С. Организация территорий общего пользования города Белгород: проекты и решения // Вектор геонаук. 2021. № 4. Том 4. С. 39–47. doi: 10.21112/2619-0761-2021-4-39-47.

31. Иконников А.В. Архитектура и градостроительство. Энциклопедия. Москва: Стройиздат, 2001. 688 с.

Информация об авторах

Василенко Наталья Анатольевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: nvasilenko_domik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Коренькова Галина Викторовна, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: G-korenkova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Земскова Анастасия Олеговна, магистрантка. E-mail: zemskova-2000@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.07.2022

© Василенко Н.А., Коренькова Г.В., Земскова А.О., 2022

***Vasilenko N.A., Korenkova G.V., Zemskova A.O.**

Belgorod Shukhov State Technological University

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

STYLISTIC AND PROPORTIONAL ARCHITECTURAL ANALYSIS OF THE RECONSTRUCTED OBJECT ON THE EXAMPLE OF THE CHAPEL POCHAEV ICON OF THE MOTHER OF GOD IN BELGOROD

Abstract. *An important component of pre-project research in the reconstruction of temples is the solution of problems of spatial analysis of the shape of an architectural object and the logic of its construction (proportional, metrorhythmic, stylistic character). This article is devoted to the issues of spatial stylistic and proportional architectural analysis of the reconstructed chapel Pochaev Icon of the Mother of God in Belgorod. The article considers the peculiarities of the style of the temple, based on the characteristic stylistic trends in the Russian Orthodox church building of the late twentieth – early twenty-first centuries, which predetermined the direction of the volumetric-plastic and constructive solution of the project proposal for reconstruction. An attempt is made to read the proportions and dimensions of the temple before and after reconstruction based on the method of proportional analysis with the identification of proportional dependencies using the golden section, the triangulation method, the Fibonacci series, reconstructed diagonals and perpendiculars, dynamic rectangles of J. Hambidge with an aspect ratio of 1: $\sqrt{2}$ and 1: $\sqrt{3}$. The stylistic and proportional architectural analysis of the temple serves as the basis for architectural and structural shaping in the process of reconstruction, determining the characteristic lines and points of newly erected forms, as well as justifying the choice of constructive solutions using reinforced concrete columns, arches, arches and arched lintels. The predominance of the innovative component in the architecture of the temple is taking into account.*

Keywords: *Orthodox Church, reconstruction, style, architectural analysis, method of proportioning, architectural canon, architectural form, architectural and constructive shaping.*

REFERENCES

1. Belkin A.N. History and modernity in the architecture of the Orthodox church [Istoriya i sovremennost v arkhitekture pravoslavnogo khrama]. Scientific Review. 2015. No. 8. Pp. 164–167. (rus)

2. Schenkov A.S. Architecture of the Russian Orthodox Church [Arkhitektura russkogo pravoslavnogo khrama]. Moscow: Monuments of Historical Thought, 2013. 528 p. (rus)

3. Laitar N.V. The problem of style in modern temple architecture of Russia [Problema stilya v sovremennoy khramamovoy arkhitekture] Izvestiya

RSPU named after A. I. Herzen. 2008. No. 77. Pp. 120–126. (rus)

4. Kesler M.Y. Reflections on the results of the competition for a modern architectural solution of the image of an Orthodox church [Razmyshleniya nad itogami konkursa na sovremennoe arkhitekturnoe reshenie pravoslavnogo khrama] Official website Mikhail Kesler architect. Heading «Articles». 2013. December 14. URL: <http://kesler.ortox.ru/2013/12/14/razmyshlenie-nad-itogami-konkursa-na-sovremennoe-arxitekturnoe-reshenie-obraza-pravoslavnogo-xrama/> (date of treatment: 12.06.2022). (rus)

5. Petrov-Spiridonov N.A. Genesis of architectural types of Orthodox churches in modernity and the line between search and «architecture of exiled meanings» [Genesis arkhitekturnykh tipov pravoslavnykh khramov v sovremennosti i gran' mezhdu poiskom i «arkhitekturoy izgnannykh smyslov»] Architecture and Modern Information Technologies. 2020. No.1(50). Pp. 23–46. doi: 10.24411/1998-4839-2020-15002

6. Solovyov A.K., Solovyov K.A. Modern cult architecture and actual problems of church art [Sovremennaya kultovaya arkhitektura i aktualnye problemy tserkovnogo iskusstva] Architecture and modern information technologies. 2017. No. 1(38). Pp. 225–242. (rus)

7. Bondarenko I.A. On the question of the symbolism of the Church chapter [K voprosu o simvolike tserkovnoy glavy] Architectural Heritage, 2019. No. 70. Pp. 5–15. (rus)

8. Bondarenko I.A. The image of the geocentric Universe in traditional architecture [Obraz geotzentricheskoy Vselennoy v traditsionnom zodchestve]. Theory in the History of Architecture and Urban Planning: publications of different years / Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, NIITIAG [Branch of the CIRDMCHCS of the Russian Federation]. St. Petersburg: Kolo, 2017. Pp. 247–261. (rus)

9. Bondarenko I.A. On two approaches to structuring space in the Old Russian architectural tradition [O dvykh podhodakh k strukturirovaniyu prostranstva v drevnerusskoy arkhitekturnoy traditsii] Architectural Heritage. 2021. No. 75. Pp. 5–13. (rus)

10. Buseva-Davydova I.L. Ideas about the symbolism of the temple in the culture of Ancient Russia (according to written sources) [Predstavleniya o simvolike khrama v culture Drevney Rusy]. Architectural heritage. 2001. Issue 44. Pp. 3–16. (rus)

11. Borisov S.V., Zverkova V.V. Architectural and compositional symbolism and principles of designing temple complexes in conditions of mountain relief [Arkhithekturno-kompozitsionnaya simbolika i printzipy proektirovaniya khramovykh kompleksov v usloviyakh gornogo relefa]. Architecton: izvestiya

vuzov. 2021. No. 3(75). doi: 10.47055/1990-4126-2021-3(75)-3. (rus)

12. Petrov-Spiridonov N.A. Semantics of «created» and «uncreated» light in Russian church architecture [Semantika «tvornogo» i «netvornogo» sveta v russkom tserkovnom zodchestve]. Architecture and Modern Information Technologies. 2021. No. 3(56). Pp. 195–213. doi: 10.24412/1998-4839-2021-3-195-213. (rus)

13. Verkhovyykh E.Yu. Principles of the formation of the «architectural canon» of the composition of an Orthodox church [Printzipy formirovaniya arkhitekturnogo kanona kompozitsiy pravoslavnogo khrama]. Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN. 2019. No. 2. Pp. 71–75. doi: 10.25628/UNIIP.2019.41.2.013 (rus)

14. Canonical requirements of church-building art [Kanonicheskie trebovaniya khramostroitel'nogo iskusstva]. System Requirements: URL: <http://www.golddomes.ru/cerkov> (date of treatment: 13.05.2022). (rus)

15. Chernysh N.D., Korenkova G.V. Problems of preservation of cultural heritage in the restoration and construction of Orthodox churches [Problemy sokhraneniya kulturnogo naslediya pri vostanovlenii i stroitel'stve pravoslavnykh khramov]: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU. 2019. 140 p. (rus)

16. Korenkova G.V., Chernysh N.D., Mityakina N.A. Adherence to the traditions of Russian Orthodox church building in the formation of special knowledge of future designers [Priverzhenost' traditsiyam russkogo pravoslavnogo khramostroeniya pri formirovaniy spetsialnykh znaniy buduzhikh proektirovzhikov] Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 105–108. (rus)

17. Borisov S.V. Application of standard space-planning elements in the design of modern parish churches [Primenenie tipovykh obemno-planirovochnykh elementov pri proektirovaniy sovremennykh khramov]. Architecture and Modern Information Technologies. 2011. No. 2(15). (rus)

18. Orthodox churches. In three volumes. Volume 1. Idea and image: A manual on design and construction (to SP 31-103-99) [Ideya i obraz. Posobie po proektirovaniy i stroitel'stvy]. MDS 31-9.2003/AHC «Arkham». Moscow: GUP CPP. 2004. 339 p. (rus)

19. Orthodox churches. In three volumes. Volume 2. Orthodox churches and complexes: A manual on design and construction (to SP 31-103-99). MDS 31-9.2003 [Pravoslavnye khramy i komplekсы. Posobie po proektirovaniy i stroitel'stvy]. AHC «Arkham». Moscow: GUP CPP, 2003. 222 p. (rus)

20. Orthodox churches. In three volumes. Volume 3. Examples of architectural and construction solutions: A manual on design and construction (to

SP 31-103-99). MDS 31-9.2003 [Primery arkhitekturno-stroitelnykh resheniy]. AHC «Arkham». Moscow: GUP CPP. 2005. 204 p. (rus)

21. SP 391.1325800.2017 Orthodox churches. Design rules [Khramy pravoslavnye]. Moscow: Standartinform. 2018. 38 p.

22. Ivina M.S. Theoretical models of the formation of the typology of Orthodox parish church complexes in the conditions of St. Petersburg [Teoreticheskie modeli formirovaniya tipologii pravoslavnykh prikhodskikh khramovykh kompleksov (na primere Sankt-Peterburga)]. Bulletin of Civil Engineers. 2016. No. 4(57). Pp. 19–27. (rus)

23. Ivina M.S. Development of the typology of modern Orthodox parish church complexes (on the example of St. Petersburg) [Razvitie tipologii sovremennykh pravoslavnykh prikhodskikh khramovykh kompleksov (na primere Sankt-Peterburga)]. Bulletin of Civil Engineers. 2015. No. 4(51). Pp. 14–18.

24. Afanasyev K.N. The construction of an architectural form by ancient Russian architects [Postroyeniye arkhitekturnoy formy drevnerusskimy zodchimy]. Moscow: Lodomir. 2002. 269 p. (rus)

25. Grigorenko G.F., Radzyukevich AV. Mathematical aspects of the architectural logic of the formation of the Roman Pantheon [Matematicheskie aspekty arkhitekturnoy logiki formoobrazovaniya rimskogo Pantheona]. Schole. Philosophical antiquity and classical tradition. 2020. Issue 1. Vol.14. doi: 10.25205/1995-4328-2020-14-1-226-245. AdobeAcrobatReader. URL: <https://reader.org/147215864> (date of treatment: 14.06.2022). (rus)

26. Radzyukevich AV. Proportional-metrological and geometric features of the formation of the

Roman Pantheon [Proportionalno-metrologicheskie i geometricheskie osobennosti formoobrazovaniya rimskogo Pantheona]. In the book: Architectural Shaping and Geometry. Moscow: LENAND. 2010. Pp. 183–194.

27. Pishchulina V.V. On the question of modules for constructing a plan of a Christian church in the North Caucasus and in the Northern Black Sea region of the X–XII centuries [K voprosy o modulyakh postroyeniya plana khristianskogo khrama na Severnom Kavkaze I v Severnom Prichernomorie X–XII vekov]. In the book: Architectural Shaping and Geometry. M.: LENAND. 2010. Pp. 161–182. (rus)

28. Pishchulina V.V. Christian temple architecture of the North Caucasus of the VI–XVI centuries [Khristianskoe khramovoe odchestvo Severnogo Kavkaza VI–XVI vekov]. Rostov-on-Don: Southern Federal University. 2012. 374 p. (rus)

29. Shevelev I.Sh., Marutaev M.A., Shmelev I.P. Golden section. Three views on the nature of harmony [Zolotoe sechenie. Tri vzglyada na prirodu garmoniy]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 343 p. (rus)

30. Danilenko E.P., Kononov A.A., Spevakov B.S. Organization of common use territories of the city of Belgorod: projects and solutions [Organizatsiya territoriy obzhego polzovaniya goroda Belgorod: proekty i resheniya]. Vector Geosciences. 2021. No. 4. Vol. 4. Pp. 39–47. doi: 10.21112/2619-0761-2021-4-39-47. (rus)

31. Ikonnikov A.V. Architecture and urban planning. Encyclopedia [Arkhitectura i gradostroitelstvo. Entziklopediya]. Moscow: Stroyizdat. 2001. 688 p. (rus)

Information about the authors

Vasilenko, Natalia A. PhD, Assistant professor. E-mail: nvasilenko_domik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Korenkova, Galina V. Assistant professor. E-mail: G-korenkova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zemskova, Anastasia O. Graduate student. E-mail: zemskova-2000@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 01.07.2022

Для цитирования:

Василенко Н.А., Коренькова Г.В., Земскова А.О. Стилиевой и пропорциональный архитектурный анализ реконструируемого объекта на примере храма Почаевской иконы Божией Матери в г. Белгороде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 64–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-64-76

For citation:

Vasilenko N.A., Korenkova G.V., Zemskova A.O. Stylistic and proportional architectural analysis of the reconstructed object on the example of the chapel pochaev icon of the Mother of God in Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 64–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-64-76

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-77-89

**Монастырская М.Е., Песляк О.А.*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

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

СПЕЦИФИКА ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КРУПНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В СКАНДИНАВСКИХ СТРАНАХ. ЧАСТЬ III: СОПОДЧИНЕННОСТЬ «НОВОГО ЛОКАЛИЗМА» ДИРЕКТИВНОМУ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ В ДАНИИ

Аннотация. В статье обоснованы актуальность и целесообразность изучения системы градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий Королевства Дания, высокая эффективность функционирования которой давно признана европейским и мировым сообществами. Показано, что сегодня в Дании действует трехуровневая система планирования, охватывающая национальный, региональный (субрегиональный) и муниципальный уровни обустройства среды обитания, на каждом из которых ярко проявляются как макрорегиональные, так и национальные особенности пространственной организации процессов жизнедеятельности: парадигмальные, институциональные, технологические, типологические и организационно-управленческие. Установлено, что на протяжении последнего столетия в Королевстве Дания последовательно реализовывалась парадигма гибкого градостроительного планирования типологически дифференцированных системных форм урбанизации. Доказано, что сегодня в содержательных рамках этой парадигмы в силу коэволюционного реформирования элементов системы административно-территориального устройства Скандинавского государства состоялась непротиворечивое замещение господствовавшего на рубеже XX–XXI вв. в датском градоформировании тренда «регионализма планирования» трендом «нового локализма». Указано, что выявленная парадигмальная трансформация, предполагающая передачу властных полномочий в сфере планирования, прогнозирования, проектирования и регулирования урбанизационных процессов с национального уровня, минуя уровень региональный, на уровень муниципалитетов, осуществляется на основе принципа соподчинения тенденции «нового локализма» тенденции директивного планирования в отношении крупных урбанизированных территорий. Результаты исследования могут послужить информационно-теоретическим и методическим обеспечением рационализации системы градостроительного планирования крупных форм урбанизированного расселения в границах геостратегических и приграничных территорий СЗФО России, в первую очередь, города федерального значения Санкт-Петербург и одноименной агломерации.

Ключевые слова: градостроительное планирование, городские агломерации, Дания, директивное планирование, метрополитенские регионы, «новый локализм», «регионализм планирования», урбанизированные территории.

Введение. Настоящая статья завершает серию публикаций, посвященных теме изучения «специфики, парадигм, регулятивных институтов и механизмов, а также – технологий сдерживания и управления процессами урбанизации в развитых странах Северной Европы» [1], в Вестнике Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Эта тема последовательно раскрывалась авторами в научных статьях, представлявших результаты исследования макрорегиональных особенностей и страновых приоритетов пространственного и градостроительного планирования в Финляндии, Швеции, Норвегии [1–3]. Теперь же речь пойдет о датских урбанистике и практике градообразования: их парадигмальных, институциональных, градотипологических, технологических и организационно-управленческих аспектах.

Позитивный опыт целенаправленного градостроительного регулирования развития крупных урбанизированных территорий в Королевстве

Дания во все времена привлекал российских урбанистов, специалистов в сфере градоформирования Северо-Западного региона нашей страны и, в первую очередь, ленинградских – петербургских ученых и практиков [4]. Интерес этот отнюдь не случаен. Город федерального значения Санкт-Петербург с момента его основания Петром Великим является мощным восточным фокусом системы урбанизированного приморского (прибрежного) расселения Балтийского региона, парасимметричным его западному фокусу – столице Королевства Дания Копенгагену. Явные реминисценции, обусловленные схожестью опорных природно-географических условий и исходным агломерационным импульсом градообразования, а также – бесподобной выразительностью и стойкостью градопланировочного образа датской столицы, сформировавшегося у петербуржцев (городских обывателей, представителей профессиональной элиты и прочих), отличают ряд разновременных структурно-планировочных,

морфологических и структурно-функциональных предложений ленинградских-петербургских зодчих по уточнению генерального плана «северной столицы» и упорядочению развития Санкт-Петербургской агломерации [5]. В этом смысле правомерным и убедительным представляется утверждение доктора архитектуры, профессора, члена-корреспондента РААСН Л.П. Лаврова о том, что изучение опыта градоформирования Копенгагена полезно и показано петербургским архитекторам, так как его результаты будут способствовать совершенствованию процессов градостроительного планирования и проектирования в Петербурге [6]. Это утверждение, наряду с соображением о целесообразности изучения всей системы градостроительного планирования Дании, аккумулирующей в себе как очевидную макрорегиональную специфику, так и несомненные национальные особенности градостроения, и признанной мировым архитектурным сообществом неким эталоном в части обеспечения социальной, экономической и экологической эффективности развития территорий и поселений, подтверждает актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является выявление особенностей осуществления градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий в Дании. *Основная задача* исследования заключается в теоретическом обобщении результатов анализа и оценки процессов формирования и функционирования современной системы градостроительного планирования в этой стране. Поэтому *объектом исследования* является система градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий Дании; *предметом же изучения* – ее парадигмальные, институциональные, типологические, технологические, организационно-управленческие особенности.

Материалы и методы. Методология исследования включала комплексное применение градотипологического, цивилизационного, системно-структурного, культурно-исторического, пространственно-морфологического подходов к изучению заявленного объекта исследования. Методика исследования состояла в изучении и обобщении основных положений научных публикаций, нормативно-правовых актов, методических рекомендаций, статистических документов, оценке планово-прогнозных и проектных разработок, а также – результатов их реализации.

Основная часть. Дания отличается интереснейшей многовековой историей урбанизации [7], истоки которой восходят к средневековью: в период VIII – XI вв. был сформирован опорный

градостроительный каркас Королевства и основано абсолютное большинство крупных датских городов [7]. Наиболее высокие темп и размах процессов урбанизации были зафиксированы в Дании в период индустриализации – во второй половине XIX-начале XX вв. [8], а также – в эпоху становления постиндустриального общества – 1960–1970-е гг.

Вплоть до середины XIX в. более 80 % человеческой популяции Дании проживало в сельских и/или полугородских населенных пунктах – деревнях и хуторах [9]. Стремительному разворачиванию процессов урбанизации во второй половине XIX в. способствовали мощное экстенсивное развитие различных отраслей промышленности и интенсивное формирование транспортной инфраструктуры страны: новые городские поселения возникали вдоль железнодорожных линий, исторически обустроенных и/или вновь трассированных маршрутов водного (в том числе паромного) транспорта, а также вблизи железнодорожных станций и паромных причалов [10]. В течение второй половины XIX века городское население Дании возросло почти на 800 тыс. жителей и достигло 30 % от общей численности человеческой популяции страны [10]; состоялся резкий приток «переселенцев» из сельских районов в основные центры урбанизации – Копенгаген (København), Орхус (Århus), Оденсе (Odense) и Ольборг (Ålborg), в которых сосредоточилось более половины всего городского населения страны.

В начале XX – первой трети XX вв. доля датчан, проживавших в городах, составляла уже 42–48 % [11]. В предвоенное и первые два послевоенные десятилетия (1930–1950-х гг.) в Дании отмечалось замедление темпов урбанизации как закономерный результат, во-первых, экономической рецессии и, во-вторых, послевоенного восстановления экономики государства [12]. В 1960–1990-е гг. доля горожан в социально-демографическом балансе страны продолжала неуклонно возрастать. При этом общий характер расселения сохранял отчетливый субурбанизированный характер [8], который закрепился значительным приращением городских поселений малой и средней крупности, обустроенных близ крупных центров урбанизации, а также вдоль основных наземных транспортных коммуникаций [13]. Этот феномен был обусловлен созданием новых промышленных кластеров и индустриальных комплексов, требовавших привлечения значительных объемов рабочей силы, а также ускоренным комплексным развитием транспортной инфраструктуры крупных городов и межселенных пространств и значительным повышением уровня автомобилизации населения [14].

Поскольку на протяжении всего XX-го столетия численность городского населения Королевства поступательно росла, постольку к середине 1990-х гг. более 85 % человеческой популяции Дании проживало в границах урбанизированных территорий, что позволяет говорить о высоком уровне урбанизации этого североевропейского государства [7]; более 50 % горожан обитало на рубеже веков в границах метрополитенской территории Копенгагена – столицы страны [7]. За последние два десятилетия показатель доли урбанизированного населения в социально-демографическом балансе Дании стабилизировался и составляет в настоящее время 88 % [15], что сопоставимо с другими скандинавскими странами; около 35 % населения страны (1 153 тыс. чел.) проживает сегодня в Копенгагене, 18 % – в границах метрополитенских территорий Орхуса, Оденсе и Ольборга [15].

Дания, в отличие от своих более крупных соседей – «скандинавов» Норвегии и Швеции, – практически полностью открыта морским пространствам: на севере и на западе – Северному морю, на юго-востоке – Балтийскому морю. Протяженность береговой линии страны составляет 7300 км [16], что почти в три раза превышает величину этого показателя, например, в Швеции, равному 2 700 км. Специфические топографические особенности территории¹ определили прибрежный и, в меньшей степени, приречный характер расселения [7] в границах датского Королевства. Проявления этого «характера» весьма своеобразны: они иллюстрируются отчетливой закономерностью снижения уровней градостроительной освоенности территорий каждого из островов и материковой части, входящих в наземные границы государства, в направлении с Востока на Запад. Так два наивысших из пяти выявленных уровней градостроительной освоенности регионов Дании² [15] достигнуты в черте города Копенгаген (плотность населения 7445 чел./кв.км) и в границах метрополитенского региона Копенгагена (плотность населения 1172 чел./кв.км), относящегося к Столичному региону, где проживает 40–45 % датчан [15]. В значительно меньшей степени, но тем не менее, достаточно плотно освоена урбанизированная территория самого Столичного региона (Hovedstaden regioner) с административным центром Хиллерёд (Hillerød) и «смежная» с ним северо-восточная

часть региона Зеландия (Sjælland regioner) с субрегиональным центром Роскилле (Roskilde) – древней столицей Дании [9] (плотность населения 150–200 чел./км²). Средним уровнем градостроительной освоенности [15] характеризуются восточная и северо-восточная части региона Южная Дания (Syddanmark regioner) с административным центром Вайле (Vejle) и субрегиональным центром Оденсе (Odense), а также – восточная часть региона Центральная Ютландия (Midtjylland regioner) с субрегиональным центром Орхус (Århus) (плотность населения 90–150 чел./км²). Региону Северная Ютландия (Nordjylland regioner), занимающему 19 % территории датского Королевства и обращенному непосредственно к Северному морю, проливам Скагеррак (Skagerrak) и Каттегат (Kattegat), равно как и обширным западным и юго-западному субрегионам Центральной Ютландии и Южной Дании, также открытым пространствам Северного моря и занимающим совокупно более 60 % территории страны, свойственен наиболее низкий из установленных в границах Королевства уровень градостроительной освоенности (плотность населения 0–90 чел./кв.км) [15].

Становление системы планирования развития территорий в Королевстве Дания в силу ограниченности земельных ресурсов государства состоялось, по сравнению с другими Скандинавскими странами, довольно рано: его можно отнести к последней четверти XIX-началу XX вв. [17]. Планирование в этот период осуществлялось по отраслевому принципу; под патронажем правительства страны выполнялись схемы и планы создания элементов и целостных фрагментов транспортной инфраструктуры, схемы и планы прокладки инженерных коммуникаций на территориях, намеченных к интенсивному освоению [17]. Тогда же были сформированы нормативно-правовые основы современного градорегулирования: определены санитарно-гигиенические нормы, сформулированы противопожарные требования, установлены предельные показатели плотности городской застройки и пр. [17].

В 1926-х г. правительством Дании был основан Датский Институт Городского планирования (Dansk Byplanlaboratorium) [17]; это учреждение стало первой институциональной единицей национального уровня, в ведении которого нахо-

¹ Дания состоит из отдельных островов с протяженностью береговых линий, не превышающих 50–60 км, с плоскоравнинным рельефом и высокой степенью горизонтальной расчлененности территории.

² Согласно Закону об административном делении Королевства Дания от 1 января 2007 г., территория

страны разделена на пять регионов (областей); второй уровень административно-территориальных образований представлен 98 коммунами (общинами).

дились вопросы градостроительного планирования, а именно: сбора и хранения информации о территориальных, структурных и функциональных резервах и ресурсах поселений и межселенных территорий, анализа и оценки насущных градостроительных проблем и возможных перспектив территориального развития различных типов поселений, разработки проектов законов в сфере городского планирования³, а также формирования и внедрения технологий привлечения населения к вопросам планирования (организация дискуссионных групп, мастер-классов, подготовка просветительских публикаций и так далее) [17]. В этот же период датские градостроители стали уделять повышенное внимание целенаправленному планированию развития крупных урбанизированных территорий. Так в 1926 г. по инициативе Датского Института Городского планирования был разработан и утвержден первый план развития транспортной инфраструктуры Большого Копенгагена; в 1928 г. был организован Комитет регионального планирования, который к 1930 г. осуществил подготовку плана-схемы развития «зеленого каркаса» метрополитенского региона датской столицы, ставшего основой последовательного проведения субъектами градообразования природоохранной политики региона, а также послужившего развитию внутригородской сети пешеходных и велосипедных городских маршрутов [17]. В 1938 году правительством Дании был принят первый Градостроительный кодекс [17]. В 1947 г. Комитет регионального планирования, сформированный из представителей властных структур 3 амтов (графств, округов) и 22 муниципалитетов, а также - нескольких стейкхолдеров, работа которого финансировалась муниципалитетами при государственной поддержке, представил на рассмотрение национального правительства и общества так называемый «Фингер-план» развития Большого Копенгагена [17]. Этот план, в полной мере отразивший новаторский – инфраструктурный - подход датских градостроителей (Steen Eliler Rasmussen и другие) к организации обширных высокоурбанизированных пригородных территорий методами зональной планировки, микрорайонирования и ландшафтной архитектуры, существенно отличался от своих шведского и норвежского анало-

гов [18]. Новый план датской столицы, к сожалению, не имел законной силы, его отличал рекомендательный характер. Однако, именно на основе первого и, как оказалось, уникального «Фингер-плана» в 1949 г. правительством Копенгагена был разработан зональный план Копенгагена, который обрел статус директивы для разработчиков проектной документации муниципалитетов⁴.

В соответствии с заявленными в «Фингер-плане» решениями, территориально-градостроительное развитие датской столицы предполагалось вдоль пяти «пальцев» [17] – новых высокоурбанизированных, имущественно и социально стратифицированных зон метрополии, берущих свое начало от так называемой «ладони» - «городского ядра» Копенгагена (Inner Metropolitan area), исторически плотно освоенного. Целостность градостроительной формы и ее высокий простраствоорганизующий потенциал был обеспечен глубоким проникновением «зеленых клиньев» – рекреационных зон и сельскохозяйственных угодий (Green areas), – в урбанизированные зоны (Outer Metropolitan area) пригородных территорий датской столицы [18]. Планом 1947 г. предусматривалась также возможность дальнейшего развития метрополитенской территории (а в перспективе – и региона) Копенгагена по полицентрической модели: за счет соединения столицы-метрополии посредством формирования линейных «урбанизированных коридоров» [17], соединяющих Копенгаген с Køge, Roskilde, Frederissund, Hillerød и Elsinore. (Рис). Эта возможность стала реальностью в корректировках «Фингер-плана», выполненных датскими градостроителями в 2003, 2007, 2013 гг. [14].

Инновационный поход к формообразованию крупной городской агломерации и/или метрополитенской территории Копенгагена в целом, заявленный уже в первом, оригинальном «Фингер-плане» 1947 г. выпуска [12], был использован его разработчиками и в процессе детального градостроительного планирования новых пригородных районов датской столицы; при этом «инфраструктурный подход к регулированию и обустройству урбанизированных территорий вдоль вылетных транспортных магистралей» [18] значительно отличался от шведской и норвежской моделей организации полуавтономных районов-

³ Одним из первых законодательных актов, подготовленных Институтом Городского планирования, стал утвержденный в 1925 г. первый в Королевстве Дания «Закон о городском планировании» (Byplanloven).

⁴ В 1949 г. в целях предотвращения бесконтрольного роста урбанизированных территорий и сохранения рекреационных территорий и сельскохозяйственных зе-

мель был принят «Закон о регулировании застроенных территорий» (Byreguleringsloven), установивший необходимость регулирования развития территорий вокруг больших городов посредством разработки законодательно утверждаемых планов зонирования на базе кооперации органов муниципальной власти [17].

спутников. «Причиной тому – морфологические закономерности развития функционально-планировочной структуры датской столицы <...>, отсутствие сильной вертикальной и горизонтальной расчлененности пригородных территорий и наличие за городской чертой многочисленных небольших, исторически сложившихся <...> поселений городского типа. В результате проведения комплекса градостроительных мероприятий в 1950-х гг. новые полуавтономные районы образовали непрерывные полосы высокоурбанизированного ландшафта вдоль пяти радиальных направлений развития системы расселения, причем структура каждого полосового района была выстроена по жесткой линейно-перпендикулярной схеме <...>. Конфигурация, величина территории новых жилых образований пригородной зоны Копенгагена регулировались спецификой формообразования коммуникационной инфраструктуры агломерации, а также необходимостью обеспечить 600–900-метровую доступность «очагов кристаллизации» [19] градостроительной композиции поселений – полифункциональных общественных центров и транспортных узлов – от внешних границ застройки. Зоны концентрации многоквартирного секционного жилья повышенной и средней этажности, согласно датской модели, позволили пространственно оформить главные коммуникационные связи с городом-центром – железнодорожные магистрали; зоны блокированных и отдельно стоящих коттеджей, особняков, городских вилл примыкали к автодорогам и занимали периферийное положение относительно пятен застройки. В силу линейного характера формообразования урбанизированных зон, динамичного и непрерывного способа их формирования снижение плотностных и объемно-пространственных показателей различных типов застройки происходило только в поперечном направлении – от транспортных коммуникаций к естественно-природному окружению» [18].

В конце 1940-х гг. оформилась проблема стремительного и бесконтрольного разрастания урбанизированных территорий за городской чертой Большого Копенгагена, то есть тех территорий, которые не являлись объектами рассмотрения ни в «Фингер-плане», ни в зональном плане столицы Дании [17]. Тогда же с аналогичными проблемами столкнулись и другие крупные датские города, фактическое развитие которых распространилось далеко за их административно-территориальные границы и привело к формированию городских агломераций преимущественно моноцентрического типа [17]. Поэтому успешная практика зонального регулирования градостроительного освоения территории Копенгагена была

учтена при разработке проектной документации для агломераций административных центров графств Ольборга и Орхуса: в 1948 году был разработан план развития метрополитенской территории Ольборга (Ålborg), а в 1954 г. – план развития метрополитенской территории Орхуса (Århus) [17].

Уже к середине 1950-х гг. фактическое неуправляемое развитие пригородных урбанизированных территорий Копенгагена и прирост населения в границах его метрополитенской территории превысили прогнозные показатели 1947 г. [10]; в этой связи возникла необходимость актуализации «Фингер-плана», которая состоялась в 1958 г. под контролем Регионального Секретариата по планированию [12].

Благоприятная экономическая ситуация, сложившаяся в Дании в 1960-1980-е гг. позволила субъектам градостроительных отношений осуществить многочисленные отраслевые проекты развития транспортных и инженерных коммуникаций в границах амтов, повысить коммуникационную связанность урбанизированных территорий государства. Не случайно именно в это тридцатилетие постепенно состоялась смена парадигмы «социального функционализма», доминировавшей в планировании 1950-х гг., к парадигме «технократического планирования» 1970-х гг. [17]. Законодательно-правовую основу планирования этого периода составили: «Закон о региональном планировании» (Lov om landsog regionplanlægning) 1973 г., «Закон о региональном планировании метрополитенских регионов» (Lov om regionplanlægning i hovedstadsområdet) 1977 г. и «Закон о муниципальном и местном планировании» (Lov om kommuneog lokalplanlægning) 1977 г. [11]. В результате практической реализации положений «Закона о региональном планировании метрополитенских регионов» планирование территории Большого Копенгагена официально перешло в ведение нового органа управления – Совета метрополитенского региона, который еще в 1973 г. подготовил новую редакцию «Фингер-плана» (будучи на тот момент неформальным объединением) [17]. Экономический подъем и социальная стабильность, свойственные Дании в этот период, дали разработчикам градостроительной документации возможность предлагать и реализовывать амбициозные проектные решения, лишь некоторая часть из которых не обрела предметно-материального воплощения (Øresund bridges, перенос Kastrup airport, строительство района West Amager) [17].

В 1990-х гг. произошли значительные изменения в целевых и деятельностных установках Датской системы регионального и местного градостроительного планирования. В новом «Законе

о планировании» 1992 г. приоритеты сбалансированного развития всех регионов страны и устранения диспропорций в функционировании урбанизированных и иных территорий были замещены установками Европейской политики пространственного планирования конкурентного развития и реализации «индивидуального потенциала регионов и муниципалитетов» [17], что предопределило резкое снижение значимости общегосударственного уровня градорегулирования процессов урбанизации: на национальном уровне планирование как вид и область градостроительной деятельности обрело форму разработки и утверждения планово-прогнозных директив и регулятивных мер. Именно поэтому функции градостроительного планирования метрополитенской территории Копенгагена (в границах метрополитенского региона) с середины 1990-х гг. и вплоть до административной реформы, проведенной в стране в соответствии с «Законом о реформировании муниципалитетов» от 1 января 2007 г., осуществлялись Советом по развитию Столичного региона, под контролем которого был разработан «Региональный план Столичного региона» 2005 г. [17].

В 2007 г. в результате реформирования административно-территориального устройства страны была ликвидирована система амтов, существовавшая в Дании с XVII в. (вместо 14 графств – амтов было образовано 5 регионов); муниципалитеты также были укрупнены (из 275 коммун или общин были сформированы 98 новых) [19]. В силу состоявшихся радикальных изменений структуры органов власти произошло перераспределение их полномочий в сфере градостроительного планирования территорий и поселений: большая часть функций по осуществлению планирования территорий, ранее выполнявшегося на уровне графств, была передана на муниципальный уровень. Одним из значимых результатов проведенной административно-территориальной реформы стала замена успешно реализованной в стране парадигмы «регионализма планирования» конца XX–начала XXI вв. парадигмой «нового локализма», предполагающей передачу властных градоорганизующих полномочий с национального уровня, минуя уровень региональный, сразу на уровень муниципалитетов [19].

Сегодня в Дании продолжает действовать трехуровневая система пространственного (градостроительного в том числе) планирования, охватывающая национальный, региональный и

муниципальный уровни обустройства среды обитания (рис. 1). Органом государственной власти, ответственным, начиная с 2007 г., за пространственное планирование на национальном уровне, а также отвечающим за интеграцию проектов, стратегий, планов и программ международного сотрудничества в рамках ООН, ЕС, и Совета государств Балтийского моря, является Агентство междисциплинарного планирования в составе Министерства окружающей среды [20]. Законодательную основу современного пространственного планирования Дании и его территориально-пространственной компоненты – планирования градостроительного, – составляют [20]:

- «Закон о планировании Дании», принятый Министерством бизнеса и развития в 2015 г.;

- «Закон о городской реконструкции и городском развитии», принятый Министерством миграции, интеграции и застройки в 2015 г.

Базовыми документами пространственного планирования на национальном уровне являются [20]:

1. «Национальные отчеты по планированию», представляющие концептуальные установки и определяющие основные принципы решения наиболее актуальных задач пространственного развития страны. Отчеты разрабатываются и утверждаются Министерством окружающей среды в начале каждого выборного периода (раз в 4 года) и имеют рекомендательный характер.

2. «Обзоры национальных интересов в муниципальном планировании», позиционирующие перечень национальных интересов в области пространственного планирования, которые должны быть учтены муниципалитетами при подготовке локальных детальных планов. Обзоры могут быть исполнены в форме: 1) нормативных документов; 2) секторальных планов; 3) планов реализации решений, утвержденных властями на национальном уровне. Обзоры также формируются Министерством окружающей среды каждые 4 года.

3. «Национальные планировочные директивы», разрабатываемые Министерством окружающей среды для территорий, требующих, по мнению властей страны, подготовки специальной документации и установления особых режимов использования территорий. Такие директивы были сформированы, в первую очередь, для метрополитенского региона Копенгагена и всех прибрежных территорий Дании.

Уровень планирования	Тип урбанизированной территории	Проектно-планировочная документация	Органы власти ответственные за планирование	Задачи разработки документации	Характер легитимности
ДАНИЯ	НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТРАНА (COUNTRY)	Национальные отчеты по планированию Обзоры национальных интересов в муниципальном планировании Национальные планировочные директивы	Агентство междисциплинарного планирования в составе Министерства окружающей среды	1. Концептуальные установки и базовые принципы решения задач пространственного планирования страны 2. Перечень национальных интересов в области пространственного планирования, обязательные к учету на всех уровнях планирования 3. Установление особого режима использования территорий национального интереса	!
	РЕГИОНАЛЬНЫЙ REGION (REGION) МЕТРОПОЛИТЕНСКИЙ РЕГИОН (METROPOLITAN REGION)	Стратегии регионального планирования Стратегический план развития региона	Региональные советы Муниципальные контактные советы	1. Выявление опорных планировочных узлов 2. Установление особо охраняемых природных территорий, историко-культурных ландшафтов, рекреационных зон, зон с высоким инвестиционным потенциалом 3. Предложения по внедрению в проекты положений национальных и международных проектов	!
	СУБРЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТРОПОЛИТЕНСКАЯ ТЕРРИТОРИЯ (METROPOLITAN AREA)	План развития метрополитенской территории (Большой Копенгаген)		1. Установление центров градостроительного развития метрополитенской территории 2. Решения по развитию транспортной, инженерной, социально-экономической системы	!
	МЕСТНЫЙ МУНИЦИПАЛИТЕТ (MUNICIPALITY) РАЙОН ГОРОДА (DISTRICT)	Муниципальные планы Локальные детальные планы	Муниципальные органы власти	1. Установление целей и стратегий развития муниципалитетов 2. Градостроительное зонирование территорий 3. Регламенты застройки 4. Параметры строительства и реконструкции 5. Режимы охраны объектов культурного наследия	!

Рис. 1. Система градостроительного планирования в Дании

На региональном уровне функции планирования осуществляют Региональные советы, исполняющие планы пространственного и градостроительного развития регионов, в которых формализуются стратегические принципы перспективного развития территорий [20]. На основе результатов комплексного анализа градоформирующего потенциала регионов выявляются опорные планировочные узлы урбанизированного каркаса, определяются границы особо охраняемых природных территорий и культурно-исторических ландшафтов, крупных рекреационных зон, территорий с высоким инвестиционным потенциалом, а также разрабатываются предложения по внедрению в проектную практику положений национальных и международных проектов, ранее подготовленных для этих регионов. Градопланировочная документация готовится целевым образом в начале каждого нового цикла региональных и местных выборов (каждые 4 года).

Важную роль на региональном уровне имеют Муниципальные контактные советы, в состав которых входят представители органов власти всех муниципалитетов региона и представители местных советов.

Основной функцией этих органов власти является реализация политических инициатив в области межмуниципального сотрудничества на региональном и субрегиональном уровнях.

Градостроительное планирование на муниципальном уровне реализуется посредством подготовки планов двух уровней: муниципального и локального [20]. Цели и стратегии развития муниципалитетов устанавливаются в муниципальных планах, которые готовятся одноименными органами власти в течение первых 2-х лет каждого выборного периода в виде планов развития муниципалитетов или их частей [20]. Эти планы

являются основой для подготовки локальных детальных планов для территорий перспективного развития в границах коммун.

Местные или локальные детальные планы могут разрабатываться как на часть территории муниципалитета, так и на отдельную группу земельных участков. В них цели и стратегии градостроительного развития муниципалитетов конкретизируются в форме градостроительного зонирования территорий и установления регламентов новой застройки, параметров реконструкции объектов капитального строительства, назначения режимов охраны объектов культурного наследия [21].

Таким образом, в результате последовательного реформирования структуры местного самоуправления в Дании задачи осуществления комплексного градостроительного планирования были делегированы муниципалитетам; состоялось также значительное институциональное расширение и содержательное приращение функций стратегического планирования на национальном уровне; региональное же планирование на сегодняшний день по праву и фактически представляет собой платформу для реализации национальных интересов пространственного развития территории страны и сферу координации взаимодействия органов муниципальной власти [21].

Для метрополитенского региона Копенгагена в настоящее время действуют национальные планировочные директивы, что, продолжая традицию планирования Копенгагена и окружающих его территорий как единого объекта градостроительного планирования [20], является уже неким исключением из действующих на сегодняшний момент общих правил градообразования Дании.

До 2007 г. градостроительное планирование Копенгагена и окружающих его территорий осуществлялось в границах метрополитенской территории, включавшей 52 муниципалитета [20]. В результате административной реформы границы планировочного объекта были расширены, в результате чего был сформирован метрополитенский регион Копенгагена, который аккумулирует сегодня все территории Столичного региона Дании (за исключением муниципалитета Борнхольм), а также муниципалитеты Гreve, Кёге, Лайре, Роскилде, Сольрёд и Стивнс соседнего региона Зеландия. Площадь метрополитенского региона, где проживает в настоящее время более 1/3 человеческой популяции страны, составляет 2768 кв. км [15].

В результате реформы 2007 г. одним из ключевых изменений стало упразднение Совета по планированию Большого Копенгагена и передача

его функций и полномочий Министерству охраны окружающей среды [15]. В 2007 г. это под руководством Министерства был разработан и утвержден «План Большого Копенгагена 2007» [22]. Законодательное утверждение плана в качестве директивного документа, жестко регулирующего большинство аспектов градостроительного развития датской столицы, стало беспрецедентным для Королевства Дания событием, поскольку все, выполненные ранее планы имели подчеркнуто рекомендательный характер [21]. Экономический кризис 2010-2012 гг. существенно снизил темпы урбанизации в метрополитенском регионе Копенгагена; и этот период, как отмечает датский специалист К. Фертнер, власти удачно использовали для корректировки и доработки плана метрополитенской территории столицы государства, выпущенного в 2007 г. [13].

Откорректированный в 2013 г. под руководством Министерства окружающей среды Дании «Фингер-план» (рис. 2) также является директивным документом; в нем одновременно отражены стратегические и оперативные решения, определяющие дальнейшее градостроительное развитие метрополитенской территории Копенгагена на ближайшие 12 лет. Планом предложено своего рода муниципальное стратегирование, то есть намечен ряд территорий Большого Копенгагена, дальнейшее градостроительное освоение которых должно быть в обязательном порядке увязано с решениями плана, например, с учетом формирования коммуникационной инфраструктуры метрополии (транспортной, инженерной, информационной, логистической, социальной и прочих) [13, 14]. Директивный характер «Фингер-плана», как отмечают датские градостроители, существенно ограничивает амбиции муниципалитетов и заставляет их «приоритезировать цели развития» [14].

Базовые положения организации территориально-градостроительной, функционально-планировочной и социально-пространственной структуры высокоурбанизированной метрополитенской территории (линейный характер формирования урбанизированных зон, отсутствие сильной вертикальной и горизонтальной расчлененности пригородных территорий, линейно-перпендикулярная структурная схема полосовых районов [13]) развивают концептуально-методологические и проектно-строительные установки «пальцевого плана Копенгагена» 1947 г. [13, 18]. При этом в планировочной модели 2013 г. четко прослеживается идея полицентричности метрополитенского региона Копенгагена; «полицентризация» в данном случае воспринимается субъектами градостроительных отношений как

оправданная реакция планировщиков на усиление центробежных тенденций урбанизации всего Столичного региона, а также сохранения укруп-

ненного функционального зонирования пригородных территорий и демаркации особо охраняемых природных территорий («зеленые клинья» между «пятью пальцами») [17].

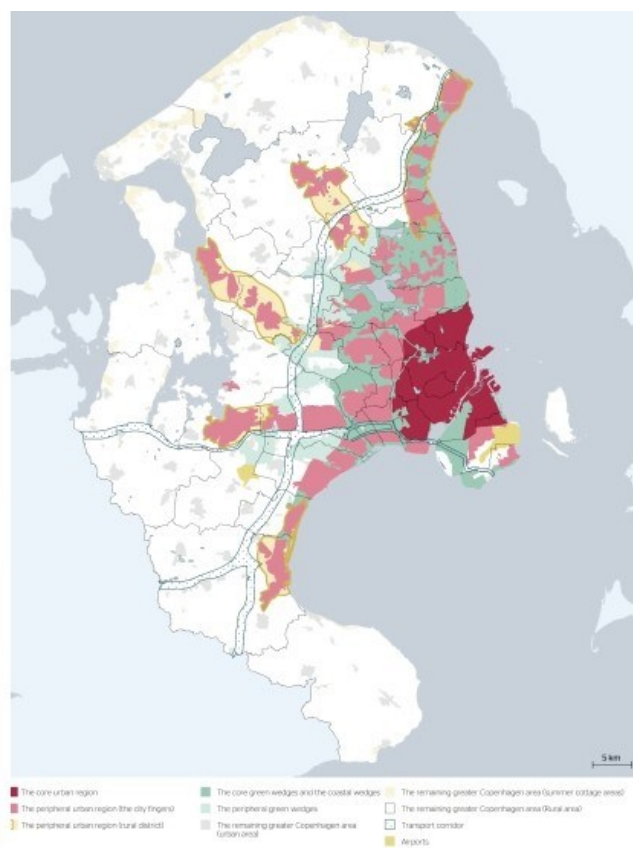


Рис. 2. «Фингер-план» Копенгагена 2013 г.

Градостроительное развитие Большого Копенгагена намечено, согласно новому градорегирующему документу, преимущественно в форме редевелопмента (около 20 % которого является «гринфилд-развитием»). Предполагаемые к редевелопменту территории расположены, главным образом, в границах бывших промышленных зон и вдоль проектируемой кольцевой линии железнодорожного сообщения, обеспечивающей взаимосвязь пяти пригородных железнодорожных станций, располагающихся на радиальных направлениях рельсового транспорта (так называемого третьего кольца) [13].

Благодаря директивному градостроительному планированию территории Большого Копенгагена датским градостроителям удалось приостановить процессы «расползания» городского ядра, в то время как, например, в другой крупной городской агломерации – Восточном Ютланде – за последние десятилетия застройка стихийно, экстенсивно и быстро разрослась вокруг города-центра. Отсутствие директивных градоформирующих установок в планировочной документации, разработанной для агломерации Восточный Ютланд, по признанию Д. Галланда – известного

европейского эксперта в области пространственного планирования, - привело к крайне негативным для всей градостроительной системы Восточного Ютланда последствиям [14]: неоправданному укрупнению, структурно-морфологической и функционально-планировочной деформации урбанизированного ядра, слабой коммуникационной связности урбанизированных зон агломерации. И этот пример из практики датского градостроения далеко не единичен.

Поэтому Д. Галланд и его коллеги С. Энемарк, Х. Андерсен, С. Эгелсдорф интерпретируют результат следования директивному планированию в границах Большого Копенгагена как ожидаемый и позитивный. Благодаря особенностям становления и развития агломерации датской столицы как целостной, устойчивой и, при этом, открытой трансформациям градостроительной формы, а также – современным условиям осуществления в ее границах градостроительной деятельности, Копенгаген стал ядром создания транснационального Эресуннского урбанизированного региона, включающего датские регионы Зеландия (Sjælland) и Хуведстаден (Hovedstaden) и шведский лён Сконе (Skåne län)

[23]. Таким образом, в последние десятилетия градоформирующая роль Большого Копенгагена – западного фокуса системы урбанизированного расселения «циркумбалтийского пространства» [24] в контексте развития еврорегионов Померании и Эресунн с учетом цивилизационных тенденций пространственной организации Северной Европы и Балтийского макрорегиона в целом существенно возросла.

Заключение. Градостроительное планирование Дании на протяжении всего XX в. являлось одним из наиболее прогрессивных в Европе: достижения датских градостроителей давно и справедливо отнесены мировым архитектурным сообществом к вершинам профессионального мастерства [12, 18]. Такой результат во многом обусловлен содержанием парадигмального, институционального и технологического аспектов создания и развития иерархической (трехступенчатой) системы национального, регионального и муниципального планирования Королевства, обеспечившим успешную реализацию на протяжении последнего столетия парадигмы гибкого градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий страны. Однако, современная тенденция на усиление роли муниципалитетов в процессах градостроительного планирования поселений и территорий, возникшая и оформившаяся в ходе проведения реформы органов местного самоуправления 2007 г., значительно ослабила роль региональных институтов в части планирования метрополитенских регионов. Это обстоятельство подтверждает выводы датских специалистов об уменьшении вертикальной связности, «сквозного» характера планирования и ослаблении комплексного интегративного подхода к градоформированию [13]. Между тем, реформа усилила институциональную синхронизацию планирования: законодательно установленные периоды действия градопланировочной документации, «привязка» и соотнесение сроков ее исполнения с выборными циклами являются инновационными решениями для Скандинавских стран. Королевство Дания является первой и пока остается единственной страной Северной Европы, в которой планы метрополитенских регионов имеют законную силу и, таким образом, служат директивами, обязательными к исполнению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Монастырская М.Е., Песляк О.А. Специфика градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий в Скандинавских странах. Часть I: Монополия муниципального планирования в Швеции // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2020. № 8. С. 46–60. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-8-46-60
2. Монастырская М.Е., Песляк О.А. Градостроительное планирование крупных урбанизированных территорий в Финляндии: парадигмы, регулятивные институты, технологии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 5. С. 77–90. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-5-77-90
3. Монастырская М.Е., Песляк О.А. Специфика градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий в Скандинавских странах. Часть II: паритетность регионального и муниципального планирования в Норвегии // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2021. № 3. С. 47–63. DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-3-47-63
4. Хромов Ю.Б. Планировочная организация рекреационных зон в городах и групповых системах расселения. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1975. 330 с.
5. Санкт-Петербург в планах и картах. XX век. Историко-культурное научно-популярное издание. СПб., Северо-Западный Картографический Центр, 2012. 424 с.
6. Лавров Л.П. Путевые заметки об архитектуре Прибалтики и не только ... // Автобус. 2008. № 2. С. 28–32.
7. Дерябин Ю.С. Северная Европа. Регион нового развития: монография. Москва: Весь Мир, 2008. 508 с.
8. Чиркова Е.Е. Копенгаген, Стокгольм, Осло // География. 2000. № 36. С. 5–12.
9. Буск С., Палудан Х. История Дании. Москва : Весь Мир, 2007. 592 с.
10. Andersen H.T., Engelstoft S. The end of urbanization? Transformation of the urban concept // Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark Dela. 2004. № 21. С. 53–67.
11. Galland D., Enemark S. The Danish National Spatial Planning System Planning for States and Nation/States: A TransAtlantic Exploration. UCD Newman House, 2012. 47 с.
12. Васильев Б.Л., Платонов Г.Д. Градостроительная практика и жилищное строительство в Скандинавских странах: Приемы планировки и застройки новых жилых районов. Л.: Госстройиздат, 1960. 127 с.
13. Fertner C. Urbanisation, urban growth and planning in the Copenhagen Metropolitan Region with reference studies from Europe and the USA // Forest & Landscape, University of Copenhagen. 2012. № 54/2012.
14. Galland D. Analysing Contemporary Metropolitan Spatial Plans in Europe Through Their Institutional Context, Instrumental Content and Planning Process // European Planning Studies. 2016. С. 181–206

15. The world bank data: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.worldometers.info/world-population/> (дата обращения: 01.06.2022)
16. Макасовский В. П. Страны и народы. Земля и человечество. Общий обзор. Северная Европа. Москва: Издательство «Мысль», 1981. 271 с.
17. Hall Thomas. Planning and Urban Growth in Nordic Countries. Routledge, 2003. 256 p.
18. Монастырская М. Е. Коттеджная застройка в Европейском градостроительстве второй половины XIX-XX века. СПб, 2017. 491 с.
19. Galland D., Enemark S. The Danish national spatial planning framework: Fluctuating capacities of planning policies and institutions // Planning for States and Nation States in the US and Europe. 2015. Ч. 9. С. 339-375.
20. OECD, Land-use Planning Systems in the OECD: Country Fact Sheets. Paris: OECD Publishing. 2017. 230 p.
21. Roodbol-Mekkes P., Brink A. Rescaling spatial planning: spatial planning reforms in Denmark, England and the Netherlands. // Environment and Planning C: Government and Policy. 2015. Ч. 33. С. 184–198.
22. Ministry of the Environment. Fingerplan 2007. Landsplandirektiv for Hovedstadsområdet Planlægning [Finger Plan 2007. National Planning Directive for the Capital Region]. Копенгаген: Министерство окружающей среды.
23. Монастырская М.Е., Песляк О.А. Урбанизированные регионы Балтики как актуальные и перспективные объекты стратегического планирования // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. №4 (53). С. 249–265. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15315.
24. Лебедев Г.С. Хайтабу: Шлезвиг = Ладога: Петербург: этапы урбанизации Балт. культур.-ист. пространства / XII конференция по изучению истории, экономики, литературы и языка скандинавских стран и Финляндии: тез. докл.: [в 2 ч.] // Рос. акад. наук. Ин-т рос. истории. М., 1993. Ч. 1. С. 128–131.

Информация об авторах

Монастырская Марина Евгеньевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры градостроительства. E-mail: gradoved@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д. 4.

Песляк Оксана Александровна, доцент кафедры градостроительства. E-mail: opeslyak@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 01.07.2022 г.

© Монастырская М.Е., Песляк О.А., 2022

***Monastyrskaya M.Ye., Peslyak O.A.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

THE SPECIFICS OF URBAN PLANNING OF LARGE URBANIZED TERRITORIES IN THE SCANDINAVIAN COUNTRIES. PART III: SUBORDINATION OF “NEW LOCALISM” TO DIRECTIVE URBAN PLANNING IN DENMARK

Abstract. The article substantiates the relevance and expediency of studying the urban planning system of large urbanized territories of the Kingdom of Denmark. The European and world communities have long recognized its high efficiency. Today, Denmark has a three-level planning system covering the national, regional (sub-regional) and municipal levels of habitat development. At each level macro-regional and national features of the spatial organization of life processes are clearly manifested: paradigmatic, institutional, technological, typological and organizational-managerial. It is established that over the last century, the paradigm of flexible urban planning of typologically differentiated systemic forms of urbanization has been consistently implemented in the Kingdom of Denmark. It is proved that today, within the substantial framework of this paradigm, due to the coevolutionary reform of the elements of the administrative-territorial structure of the Scandinavian state, a consistent replacement of the trend of “planning regionalism” that prevailed at the turn of the XX-XXI centuries in the Danish urban formation with the trend of “new localism” took place. It is indicated that the identified paradigm transformation involves the transfer of authority in the field of planning, forecasting, design and regulation of urbanization processes from the national level. Thus, it bypasses the regional level, to the level of municipalities, implements, based on the principle of subordination to the trend of “new localism”, the trend of directive planning in relation to large urbanized territories. The results of the

study can serve as information, theoretical and methodological support for the rationalization of the urban planning system of large forms of urbanized settlement within the boundaries of geostrategic and border territories of the Northwestern Federal District of Russia: the federal city of St. Petersburg and the agglomeration of the same name.

Keywords: *urban planning, urban agglomerations, Denmark, directive planning, metropolitan regions, "new localism", "planning regionalism", urbanized territories.*

REFERENCES

1. Monastyrskaya M.E., Peslyak O.A. The specifics of urban planning of large urbanized territories in the Scandinavian countries. Part I: The Monopoly of Municipal planning in Sweden [Specifika gradostroitel'nogo planirovaniya krupnyh urbanizirovannyh territorij v Skandinavskih stranah. CHast' I: Monopoliya municipal'nogo planirovaniya v SHvecii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 8. Pp. 46–60. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-8-46-60 (rus)
2. Monastyrskaya M.E., Peslyak O.A. Urban planning of large urban areas in Finland: paradigms, regulatory institutions, technologies [Gradostroitel'noe planirovanie krupnyh urbanizirovannyh territorij v Finlyandii: paradigmy, reguljativnye instituty, tekhnologii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 77–90. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-5-77-90(rus)
3. Monastyrskaya M.E., Peslyak O.A. The specifics of urban planning of large urbanized territories in the Scandinavian countries. Part II: Parity of regional and municipal planning in Norway [Specifika gradostroitel'nogo planirovaniya krupnyh urbanizirovannyh territorij v Skandinavskih stranah. CHast' II: paritetnost' regional'nogo i municipal'nogo planirovaniya v Norvegii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 3. Pp. 47–63. DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-3-47-63 (rus)
4. Hromov YU.B. Planning organization of recreational zones in cities and group settlement systems [Planirovochnaya organizaciya rekreacionnyh zon v gorodah i gruppovyh sistemah rasseleniya]. L.: Strojizdat, Leningr. ot-nie, 1975. 330 p. (rus)
5. St. Petersburg in plans and maps. XX century. Historical and cultural popular science publication. [Sankt-Peterburg v planah i kartah. HKH vek. Istoriko-kul'turnoe nauchno-populyarnoe izdanie]. St. Petersburg, North-Western Cartographic Center, 2012. 424 p. (rus)
6. Lavrov L.P. Travel notes on the architecture of the Baltic States and not only ... [Putevyje zametki ob arhitekture Pribaltiki i ne tol'ko ...]. Bus. 2008. No 2. Pp. 28–32. (rus)
7. Deryabin Yu.S. Northern Europe. The region of new development: monograph [Severnaya Evropa. Region novogo razvitiya: monografiya]. Moscow: The Whole World. 2008. 508 p. (rus)
8. Chirkova E.E. Copenhagen, Stockholm, Oslo [Kopengagen, Stokgol'm, Oslo]. Geography. 2000. No. 36. Pp. 5–12. (rus)
9. Busk S., Paludan H. The History of Denmark [Istoriya Danii]; Moscow : The Whole World. 2007. 592 p.
10. Andersen H. T., Engelstoft S. The end of urbanization? Transformation of the urban concept. Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark Dela. 2004. No. 21. Pp. 53–67.
11. Galland D., Enemark S. The Danish National Spatial Planning System Planning for States and Nation/States: A TransAtlantic Exploration, UCD Newman House, 2012. 47 p.
12. Vasil'ev B.L., Platonov G.D. Urban planning practice and housing construction in the Scandinavian countries: Methods of planning and development of new residential areas [Gradostroitel'naya praktika i zhilishchnoe stroitel'stvo v Skandinavskih stranah: Priemy planirovki i zastrojki novyh zhilyh rajonov]. L.: Gosstrojizdat, 1960. 127 p. (rus)
13. Fertne C. Urbanisation, urban growth and planning in the Copenhagen Metropolitan Region with reference studies from Europe and the USA. Forest & Landscape, University of Copenhagen. 2012. No. 54/2012.
14. Galland D., Analysing Contemporary Metropolitan Spatial Plans in Europe Through Their Institutional Context, Instrumental Content and Planning Process. European Planning Studies. 2016. Pp. 181–206.
15. The world bank data. URL: <https://www.worldometers.info/world-population/> (date of treatment: 01.06.2022)
16. Maksakovskij V. P. Countries and peoples. Earth and humanity. General overview. Northern Europe. [Strany i narody. Zemlya i chelovechestvo. Obshchij obzor. Severnaya Evropa]. Moscow: Publishing House "Thought", 1981. 271 p. (rus)
17. Hall Thomas. Planning and Urban Growth in Nordic Countries. Routledge. 2003. 256 p.
18. Monastyrskaya M. E. Cottage development in European urban planning of the second half of the XIX-XX century. [Kottedzhnaya zastrojka v Evropejskom gradostroitel'stve vtoroj poloviny XIX-XX veka]. SPb, 2017. 491 p. (rus)
19. Galland D., Enemark S. The Danish national spatial planning framework: Fluctuating capacities of planning policies and institutions. Planning for States and Nation States in the US and Europe. 2015. Vol. 9. Pp. 339–375

20.OECD, Land-use Planning Systems in the OECD: Country Fact Sheets. Paris: OECD Publishing. 2017. 230 p.

21.Roodbol-Mekkes P., Brink A. Rescaling spatial planning: spatial planning reforms in Denmark, England and the Netherlands. *Environment and Planning C: Government and Policy*. 2015. Vol. 33. Pp. 184–198

22.Ministry of the Environment. Fingerplan 2007. Landsplandirektiv for Hovedstadsomra dets Planlægning [Finger Plan 2007. National Planning Directive for the Capital Region]. Copenhagen: Ministry of the Environment.

23.Monastyrskaya M.E., Peslyak O.A. Urban regions of the Baltic sea as current and long-term

strategic planning [Urbanizirovannye regiony Baltiki kak aktual'nye i perspektivnye ob"ekty strategicheskogo planirovaniya]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. No. 4(53). Pp. 249–265. (rus)

24.Lebedev G.S. Haitabu: Schleswig = Ladoga: Petersburg: stages of urbanisation of the Baltic cultures-East. Space [Hajtabu: SHlezvig = Ladoga: Peterburg: etapy urbanizacii Balt. kul'tur.-ist. prostranstva]. XII conference on the study of the history, economy, literature and language of the Scandinavian countries and Finland: TEZ. Dokl.: [in 2 parts] [XII konferenciya po izucheniyu istorii, ekonomiki, literatury i yazyka skandinavskih stran i Finlyandii: tez. dokl.]. Russian Academy of Sciences. In-t ROS. history. Moscow, 1993. P.1. Pp. 128–131. (rus)

Information about the authors

Monastyrskaya, Marina E. PhD, Assistant professor. E-mail: gradoved@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-nd Krasnoarmeyskaya st., 2.

Peslyak, Oksana A. Assistant professor. E-mail: opeslyak@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-nd Krasnoarmeyskaya st., 2.

Received 01.07.2022

Для цитирования:

Монастырская М.Е., Песляк О.А. Специфика градостроительного планирования крупных урбанизированных территорий в скандинавских странах. Часть III: соподчиненность «нового локализма» директивному градостроительному планированию в Дании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 77–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-77-89

For citation:

Monastyrskaya M.Ye., Peslyak O.A. The specifics of urban planning of large urbanized territories in the Scandinavian countries. Part III: subordination of “new localism” to directive urban planning in Denmark. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 77–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-77-89

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-90-98

Павленко В.И., *Кашибадзе В.В., Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Домарев С.Н.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: vitaliy.kashibadze@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДсорбЦИИ ЭТИЛГИДРОСИЛОКСАНА НА ПОВЕРХНОСТИ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы модифицирования поверхности порошка карбида вольфрама этилгидросилоксаном. Изучена морфология и гранулометрический состав исходного карбида вольфрама. Для модифицирования порошка проводили предварительное растворение олигомера в *n*-гексане. Установлено, что адсорбционное равновесие устанавливается в первый час. На основе полученных данных построена изотерма адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама в зависимости от равновесной концентрации. Установлено, что изотерма адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама имеет типичный характер мономолекулярной (монослойной) адсорбции. При равновесной концентрации 0,12 мг/см³ кривая изотермы адсорбции выходит на плато. Представлены данные по определению параметров адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на поверхности карбида вольфрама: посадочная площадка, занимаемая одной молекулой олигомера и толщина адсорбционного слоя олигомера. Показано, что модифицирование этилгидросилоксаном приводит к переходу от гидрофильной поверхности к гидрофобной. Для установления гидрофобизации поверхности карбида вольфрама после модифицирования этилгидросилоксаном были определены краевые углы смачивания поверхности до и после модифицирования. При концентрациях олигомера свыше 0,12 мг/см³ краевой угол смачивания поверхности карбида вольфрама водой обладает максимальным значением $96 \pm 2^\circ$.

Ключевые слова: модифицирование, адсорбция, карбид вольфрама, композиционный материал, толщина адсорбционного слоя, гидрофобизация.

Введение. Вопрос разработки новых отечественных композиционных материалов, которые могут стать альтернативной заменой зарубежных материалов в связи с введением санкции против России, является весьма актуальным. Сочетание нескольких компонентов в едином композите позволяет получать материалы с улучшенными физико-техническими и эксплуатационными свойствами, а также заранее программировать необходимые функциональные свойства [1–5]. Композиционные материалы применяют в различных отраслях промышленности: в металлургическом, машиностроительном, агропромышленном и авиационном комплексе [6–8]. Поэтому при разработке композитов в первую очередь необходимо учитывать нагрузки и условия, в которых будут использоваться материалы.

Основными задачами при синтезе композиционных материалов является рациональный подбор компонентов, а также совместимость этих компонентов [9–10]. При синтезе композиционных материалов на основе полимерного связующего необходимо особое внимание уделить равномерности распределения компонентов и их агрегации [11–13]. Одним из известных способов равномерного распределения минеральных компонентов в связующем является гидрофобизация их поверхности [14–15]. Для модифицирования

используют различные соединения, чаще органические или кремнийорганические. Chen и др. [16] изучали возможность улучшения межфазной адгезии между полимерной матрицей и наполнителями путем поверхностной модификацией неорганических наполнителей. Авторами было установлено увеличение межфазной адгезии стоматологических композитов путем обработки поверхности наполнителей связующими агентами, полимерами и покрытиями из тетраэтилортосиликата (ТЭОС).

Beloborodov и др. [17] исследовали возможность гидрофобизации диатомита и трепела обработкой кремнийорганическими соединениями (гидрофобизирующей кремнийорганической жидкостью ГКЖ-94) и влияние модифицирования на свойства композитов. Установлено, что введение ГКЖ-94 увеличивает удельную поверхность наполнителя: при одинаковом времени обработки в шаровой мельнице увеличение удельной поверхности составляло от 500 до 1052 см²/г. Кроме того, наблюдалось значительное увеличение прочности композита при изгибе на 22–31 %.

Sandomierski и др. [18] разработали эффективный способ модифицирования поверхности цеолита катионом 4-(диметиламино) бензолдиазония для получения активного наполнителя, содержащего диметиламиногруппы. Все прове-

денные испытания доказали, что добавление некоторого количества модифицированного цеолита благотворно влияет на конечный композит на основе метакриловой смолы.

Модифицирование поверхности минеральных частиц кремнийорганическими соединениями приводит не только к гидрофобизации поверхности, но и к увеличению термической стабильности, коррозионной и эрозионной стойкости материала. Икаев и др. [19] установили возможность модификации оксидов железа (α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃) этоксисиланами и диэтиловым эфиром бутилфосфоновой кислоты. Модифицированные оксиды железа обладали повышенной коррозионной и эрозионной стойкостью, по сравнению и исходными оксидами. Глазунова и др. [20] исследовали процесс модифицирования природного каолинита хлорсиланом при жидкофазной адсорбции из *o*-ксилола.

В данной работе исследовали возможность модифицирования карбида вольфрама полиэтилгидросилоксаном. Представлены результаты исследования параметров адсорбции полиэтилгидросилоксана из *n*-гексана на поверхности карбида вольфрама.

Материалы и методы. Карбид вольфрама (WC) представляет собой порошок черного цвета, синтезированный методом получения порошков тугоплавких металлов и их карбидов по уникальной технологии из лома твердосплавных изделий производства [21].

Анализ гранулометрического состава порошка проводили с использованием метода лазерного рассеивания на дифракционном микроанализаторе Analysette 22 NanoTec plus ("Fritsch GmbH", Германия). Диспергирование порошка проводили в жидкой среде. В качестве диспергатора использовали раствор этилового спирта. Параметры ультразвука при гранулометрическом анализе: мощность и частота ультразвука 60 Вт (макс.)/36 кГц, время воздействия 4 мин.

Микроскопию поверхности частиц карбида вольфрама определяли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU ("Tescan", Чехия).

До проведения исследований по гранулометрии и микроскопии проводили дополнительную обработку на ультразвуковой лабораторной установке И100-840 (44 кГц, 10 мин. в спиртовом растворе) (ООО «Ультразвуковая техника–ИНЛАБ», Россия).

Для модифицирования использовали жидкость гидрофобизирующую 136-41 ГОСТ 10834-76, которая представляет собой полимерный этилгидросилоксана (производитель ООО «Силан»). Массовая доля активного водорода составляла 1,39 %, pH=7, плотность при 20 °С –

1,001 г/см³, кинематическая вязкость при 20 °С – 115 сСт.

Адсорбцию этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама изучали с помощью УФ-спектрометра Specord S300 UV VIS ("Analytik Jena AG", Германия) в ультрафиолетовой области при $\lambda = 300$ нм. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений оптической плотности у спектрометра – $\pm 0,02$ Б, а пределы допускаемой абсолютной погрешности установки длин волн – $\pm 1,0$ нм.

Для определения равновесной концентрации строили калибровочный график. В мерные колбы на 50 мл приготавливали растворы этилгидросилоксана в *n*-гексане путем разбавления его насыщенного раствора с концентрацией 0,001 моль/л в 2, 4, 6, 8 и 10 раз. Далее рассчитывали концентрацию полученных растворов. Используя значения оптической плотности в ультрафиолетовой области при $\lambda = 300$ нм, полученные для растворов с известной концентрацией, строили калибровочный график.

Концентрацию этилгидросилоксана в растворе *n*-гексана определяли после адсорбции с помощью калибровочного графика. Количество адсорбированного этилгидросилоксана (моль/г карбида вольфрама), отнесенное к массе карбида вольфрама, рассчитывали по уравнению:

$$\Gamma = \frac{\Delta C \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где ΔC – разность исходной концентрации раствора олигомера этилгидросилоксана и концентрации раствора после адсорбции, моль/л; V – объем раствора, л; m – масса карбида вольфрама.

Посадочную площадку, занимаемую одной молекулой олигомера, вычисляли по уравнению:

$$S_0 = \frac{M}{\Gamma_{\infty} \cdot N_A}, \quad (2)$$

где M – молекулярная масса, Γ_{∞} – предельная адсорбция, кг/м², N_A – число Авогадро, равное $6,02 \cdot 10^{23}$.

Толщина адсорбционного слоя олигомера соответствует длине его молекулы, которую вычисляли по уравнению:

$$\delta = \Gamma_{\infty} / \rho, \quad (3)$$

где ρ – плотность олигомера, кг/м³.

Краевой угол смачивания определяли с использованием системы анализа формы капли Krüss DSA30 ("Krüss GmbH", Германия). Анализ формы капли основан на уравнении Юнга-Лапласа. Это уравнение описывает разность давлений (давление Лапласа) между областями внутри и снаружи криволинейной поверхно-

сти/границы раздела жидкости с главными радиусами кривизны. Соответствующий процесс оценки называется методом подвешной капли.

Основная часть. На рисунке 1 представлены данные по гранулометрическому составу карбида вольфрама. Анализ данных рисунка 1 показал, что карбид вольфрама имеет размеры

частиц в диапазоне от 0,08 мкм до 25,11 мкм, медианный размер частиц 10,44 мкм, а удельная поверхность частиц 108268 см²/см³. Заметно, что достаточно большое количество части имеет размер менее 100 нм. Это связано с используемой технологией синтеза карбида вольфрама из лома твердосплавных изделий производства [21].

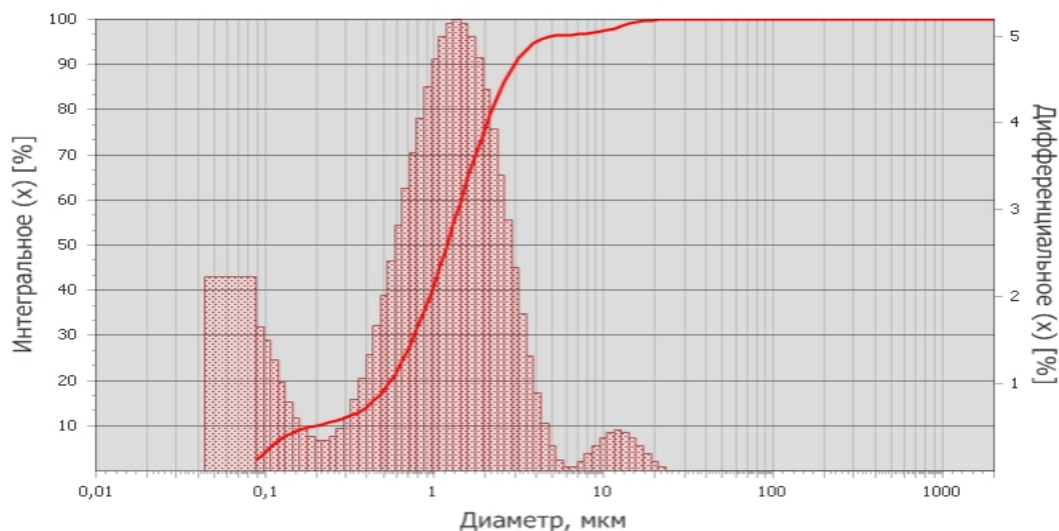


Рис. 1. Гранулометрический состав карбида вольфрама

На рисунке 2 представлены изображения частиц карбида вольфрама при различном разрешении. Съемка проводилась после высушивания

порошка при температуре 180 °С в течение 2-х часов. Это способствовало полному удалению физически связанной воды.

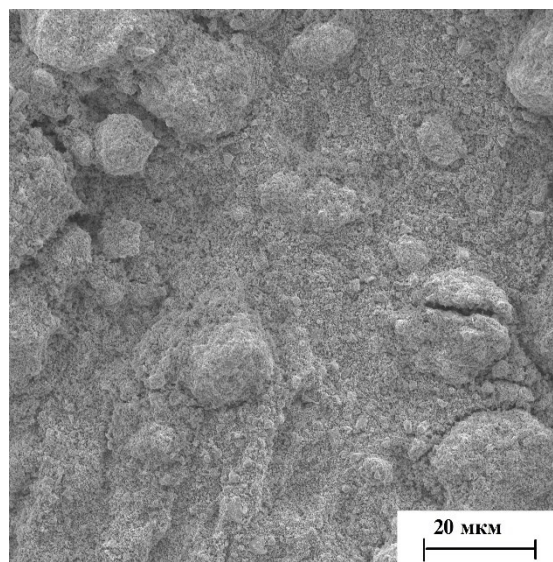
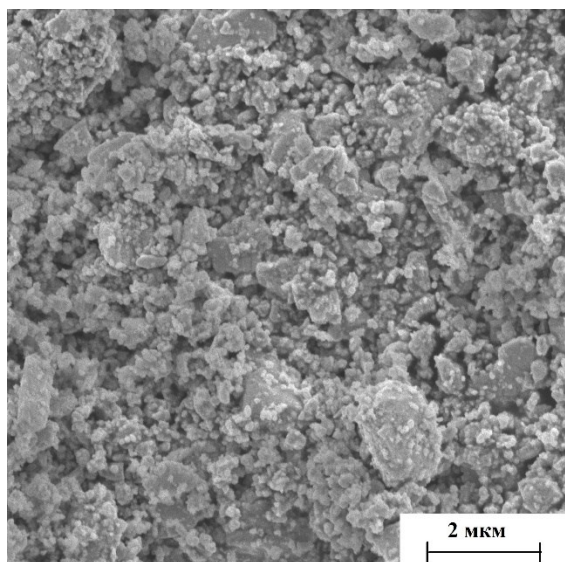


Рис. 2. Микроскопия поверхности порошка карбида вольфрама при различном увеличении

Частицы карбида вольфрама по данным СЭМ имеют размер от 0,25 мкм до 2 мкм и представляют собой землистую мелкокристаллическую массу. В отдельных случаях мелкокристаллическая масса агрегирует и достигает размеров в 20 мкм.

Для проведения модифицирования порошка карбида вольфрама этилгидросилоксаном проводили предварительное растворение олигомера в *n*-гексане. Далее навеску карбида вольфрама определенной массы засыпали в специальные колбы с растворенным олигомером. Для установления адсорбционного равновесия дальнейшее центрифугирование раствора проводили через 1

час, 2 часа и 24 часа. По проведенным исследованиям адсорбционное равновесие установилось в первый час. Для определения необходимого количества олигомера и его оптимальной концентрации в растворителе строили изотерму адсорбции. Изотерма адсорбции представляет собой кривую зависимости величины адсорбции от концентрации адсорбтива в равновесном состоянии.

Изотермы адсорбции легче всего измерить, поместив фиксированное количество порошка в известное количество раствора олигомера, а в стеклянные банки вместе с небольшими (например, 8 мм) стеклянными шариками в качестве вспомогательного средства для измельчения и оставив банки на 24 часа на ролики, так что получается постоянное перемешивание. Затем центрифугирование позволит разделить непрерывную фазу, чтобы можно было определить количество адсорбированного материала [22]. Альтернативным методом получения изотермы ад-

сорбции является помещение пигмента в хроматографическую колонку и пропускание разбавленного раствора адсорбата вниз по колонке с пигментом, как описано Кроулом [22]. Преимущество хроматографического метода состоит в том, что он позволяет легко определить преимущественную адсорбцию и обратимость адсорбции. Этот метод обычно хорошо работает с органическими адсорбентами, однако скорость потока минеральных порошков (в том числе и карбида вольфрама) через пигментную колонку на практике очень мала, что делает метод гораздо менее привлекательным, чем может показаться на первый взгляд.

В данной работе была получена изотерма адсорции методом УФ-спектроскопии.

На рисунке 3 представлена изотерма адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама в зависимости от равновесной концентрации. Исследования адсорбции проводили при постоянной температуре 25 °С.

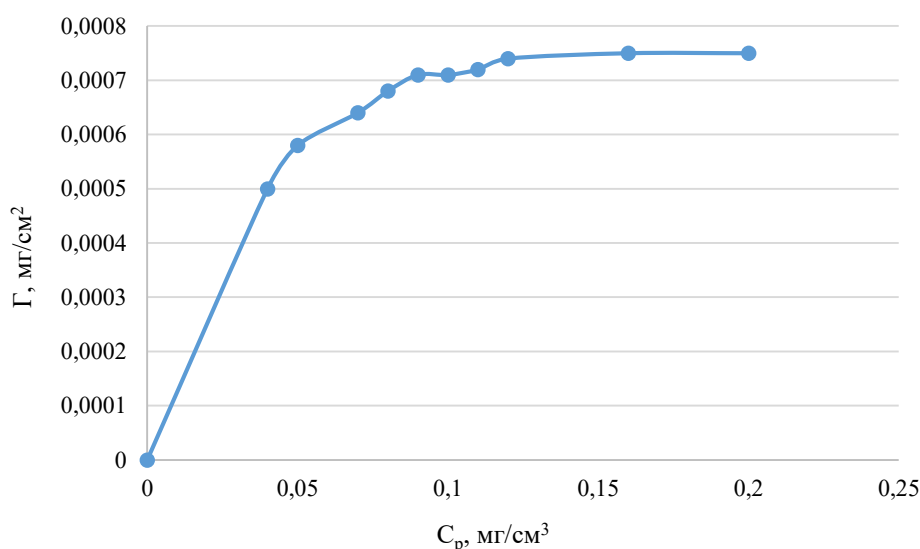


Рис. 3. Изотерма адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама

Анализ данных рисунка 3 показал, что изотерма адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама имеет типичный характер мономолекулярной (монослойной) адсорбции. При равновесной концентрации 0,12 мг/см³ кривая изотермы адсорбции выходит на плато. Адсорбция олигомерных молекул этилгидросилоксана на частицах карбида вольфрама представляет собой физическую адсорбцию.

Были вычислены следующие параметры адсорбции олигомерных молекул этилгидросилоксана на поверхности карбида вольфрама: посадочная площадка, занимаемая одной молекулой

олигомера и толщина адсорбционного слоя олигомера. Для вычислений дополнительно были определены молекулярная масса олигомера и его плотность. Молекулярную массу олигомера этилгидросилоксана определяли криоскопическим методом (метод Раствора) на приборе Бекмана. Молекулярную массу оценивали по понижению температуры замерзания раствора олигомера этилгидросилоксана в диметилсульфоксиде по сравнению с температурой замерзания чистого растворителя по формуле:

$$M = \frac{K \cdot g_2 \cdot 1000}{g_1 \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где g_1 – масса диметилсульфоксида, г; g_2 – масса олигомера, г; K – криоскопическая константа для диметилсульфоксида, $K = 4,7$; ΔT – разница температур замерзания.

Молекулярная масса олигомера этилгидросилоксана, вычисленная данным методом, составила 1480 г/моль. Плотность этилгидросилоксана составляла 1,01 г/см³.

Расчет посадочной площадки, занимаемой одной молекулой этилгидросилоксана на карбиде вольфрама:

$$S_0 = \frac{1,01}{0,075 \cdot 10^{-5} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 2,2 \text{ нм}^2. \quad (5)$$

Расчет толщины адсорбционного слоя этилгидросилоксана на карбиде вольфрама:

$$\delta = \frac{0,075 \cdot 10^{-5}}{1480} = 0,5067 \text{ нм}. \quad (6)$$

Для установления гидрофобизации поверхности карбида вольфрама после модифицирования этилгидросилоксаном были определены краевые углы смачивания поверхности до и после модифицирования. Для определения значения краевого угла смачивания измеряли как левый, так и правый угол. Измерения проводили не менее 5 раз, а затем вычисляли среднее значение краевого угла смачивания и среднеквадратичное отклонение с учетом критерия Стьюдента. Данные по влиянию концентрации этилгидросилоксана на степень гидрофобности карбида вольфрама представлены в таблице 1. Краевой угол смачивания измеряли с использованием двух жидкостей: дистиллированной воды и дийодметана.

Таблица 1

Влияние концентрации этилгидросилоксана на степень гидрофобности карбида вольфрама

Равновесная концентрация этилгидросилоксана, мг/см ³	Краевой угол смачивания, θ°	
	Жидкость	
	Вода	Дийодметан
0	45±1	18±1
0,04	74±2	36±1
0,05	89±2	39±1
0,07	91±2	45±1
0,08	92±2	59±1
0,09	93±2	60±2
0,10	94±2	64±2
0,11	95±2	65±2
0,12	96±2	69±2
0,16	96±2	69±2
0,20	96±2	69±2

Анализ данных таблицы 1 показал, что модифицирование этилгидросилоксаном приводит к переходу от гидрофильной поверхности к гидрофобной. При концентрациях олигомера свыше 0,12 мг/см³ краевой угол смачивания поверхности карбида вольфрама водой обладает максимальным значением 96±2°, при этом исходное значение краевого угла смачивания составляет 45±1°, что в более чем 2 раза ниже. Можно заметить, что краевой угол смачивания поверхности карбида вольфрама дийодметаном значительно меньше по сравнению с углом смачивания водой при одной и той же равновесной концентрации. Значение краевого угла смачивания порошка дийодметаном прямолинейно возрастает с увеличением значения равновесной концентрации этилгидросилоксана до достижения максимального значения угла в 69±2°. При увеличении равновесной концентрации более 0,12 мг/см³ значение краевого угла смачивания дийодметаном не изменяется. Это также подтверждает данные о

характере мономолекулярной (монослойной) адсорбции и предельная адсорбция при равновесной концентрации 0,12 мг/см³.

Выводы. В работе установлена возможность модифицирования поверхности карбида вольфрама этилгидросилоксаном с использованием предварительного растворения олигомера в *n*-гексане.

Выявлено, что адсорбционное равновесие устанавливается в первый час и является необратимым. Посадочная площадка, занимаемая одной молекулой этилгидросилоксана на карбиде вольфрама составляет 2,2 нм², а толщина адсорбционного слоя этилгидросилоксана на карбиде вольфрама – 0,5067 нм.

Установлено, что модифицирование карбида вольфрама этилгидросилоксаном приводит к переходу от гидрофильной поверхности к гидрофобной. При концентрациях олигомера свыше

0,12 мг/см³ краевой угол смачивания поверхности карбида вольфрама водой обладает максимальным значением $96 \pm 2^\circ$.

Разработанный модифицированный порошок карбида вольфрама может найти применение при синтезе высоконаполненных композиционных материалов. Гидрофобная поверхность порошка позволит равномерно распределиться в связующей и значительно уменьшить агрегацию частиц, что приведет к повышению физико-механических и функциональных свойств композиционного материала.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00316 (продление), <https://rscf.ru/project/19-19-00316/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Singh A.P., Gupta B.K., Mishra M., Govind M., Chandra A., Mathur R.B., Dhawan S.K. Multi-walled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties // Carbon. 2013. Vol. 56. Pp. 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.081>
2. Колпачков Е.Д., Курносов А.О., Петрова А.П., Раскутин А.Е. Гибридные полимерные композиционные материалы для авиации на основе волокнистых наполнителей (Обзор) // Вопросы материаловедения. 2020. Том. 1(101). С. 126–138. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-101-1-126-138>
3. Arora G.S., Saxena K.K., Mohammed K.A., Prakash C., Dixit S. Manufacturing Techniques for Mg-Based Metal Matrix Composite with Different Reinforcements // Crystals. 2022. Vol. 12. 945. <https://doi.org/10.3390/cryst12070945>
4. Zhantlessova S., Savitskaya I., Kistaubayeva A., Ignatova L., Talipova A., Pogrebnjak A., Digel I. Advanced “Green” Prebiotic Composite of Bacterial Cellulose/Pullulan Based on Synthetic Biology-Powered Microbial Coculture Strategy // Polymers. 2022. Vol. 14, 3224. <https://doi.org/10.3390/polym14153224>
5. Micheli D., Apollo C., Pastore R., Morles R.B., Laurenzi S., Marchetti M. Nanostructured composite materials for electromagnetic interference shielding applications // Acta Astronautica. 2011. Vol. 69. Is. 9–10. Pp. 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.06.004>
6. Балинова Ю.А., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Чайникова А.С., Курбаткина Е.И., Большакова А.Н. Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2. С. 83–92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-83-92>
7. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 5. С. 15–19. https://doi.org/10.12737/article_590878fa94e168.59204031
8. Mayank, Bardenhagen A., Sethi V., Gudwani H. Spider-silk composite material for aerospace application // Acta Astronautica. 2022. Vol. 193. Pp 704–709. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.08.013>
9. Zaichenko N.M., Nefedov V.V. Poly(ethylene terephthalate) composite material with modified fly ash filler // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 101(1). Article No. <https://doi.org/10103.1034910/MCE.101.3>
10. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // Строительные материалы. 2008. № 11. С. 42–44.
11. Яновский Ю.Г., Козлов Г.В., Карнет Ю.Н. Фрактальное описание значимых наноэффектов в среде полимерных композитов с наноразмерными наполнителями. Агрегация, межфазные взаимодействия, усиление // Физическая мезомеханика. 2012. №15. С. 21–34.
12. Kozlov G.V., Mirzoev R.S., Lipatov Y.S. Aggregation of Filler Particles in Polymer Composites. An Analysis within the Framework of Irreversible Aggregation Models // Mechanics of Composite Materials. 2022. Vol. 38. С. 169–174. <https://doi.org/10.1023/A:1014989712013>
13. Dorigato A., Dzenis Y., Pegoretti A. Filler aggregation as a reinforcement mechanism in polymer nanocomposites // Mechanics of Materials. 2013. Vol. 61. Pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.02.004>
14. Везенцев А.И., Кривенко Ю.Ю. Гидрофобизация тонкодисперсного мела // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2021. № 6. С. 63–70. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-6-63-70>
15. Le P.T., Nguyen K.T. Hydrophobizing cellulose surfaces via catalyzed transesterification reaction using soybean oil and starch // Heliyon. 2020. Vol. 6. Is. 11. e05559. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05559>
16. Chen H., Wang R., Qian L., Ren Q., Jiang X., Zhu M. Dental Restorative Resin Composites: Modification Technologies for the Matrix/Filler Interface // Macromolecular Materials and Engineering. 2018. Vol. 303. Is.10, 1800264. <https://doi.org/10.1002/mame.201800264>
17. Beloborodov I.I., Sukhostavets S.V. Modification of Powder Fillers in Order to Improve Oper-

ating Properties of Composite Polymer-Based Materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2004. Vol. 43. Pp. 219–222. <https://doi.org/10.1023/B:PMMC.0000042453.83818.0a>

18. Sandomierski M., Okulus Z., Voelkel A. Active diazonium-modified zeolite fillers for methacrylate-based composites // Composite Interfaces. 2019. Vol. 26:7. Pp. 643–657. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1526564>

19. Ikaev A.M., Mingalyov P.G., Lisichkin G.V. Chemical modification of iron oxide surface with organosilicon and organophosphorous compounds // Colloid Journal. 2007. Vol. 69. Pp. 741–746. <https://doi.org/10.1134/S1061933X07060105>

20. Глазунова И.В., Тищенко Ю.В., Фило-
ненко Ю.Я., Петухова Г.А. Губкина М.Л. Модифи-

цирование природного каолинита Лукошкинского месторождения Липецкой области хлорсодержащими кремнийорганическими соединениями // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2006. Том 49. Вып. 11. С. 63–67.

21. Pat. EP 3138932 A1 Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron or submicron range; Publication EP 3138932 A1 20170308 (DE); Application; EP 15002564 A 20150901; Priority EP 15002564 A -20150901

22. Doroszkowski A. 6 - The physical chemistry of dispersion: Book chapter in Paint and Surface Coatings, Editors R. Lambourne, T.A. Strivens. 1999. Woodhead Publishing Limited. Pp. 198–242.

Информация об авторах

Павленко Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кашибадзе Виталий Валерьевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: vitaliy.kashibadze@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Романюк Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: romanyuk.dmitrij.98@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сидельников Роман Владимирович, лаборант-исследователь НИЛ 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.

Домарев Семен Николаевич, инженер-исследователь НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: domarev542@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.08.2022 г.

© Павленко В.И., Кашибадзе В.В., Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Домарев С.Н., 2022

Pavlenko V.I., *Kashibadze V.V., Romanyuk D.S., Sidelnikov R.V., Domarev S.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: vitaliy.kashibadze@mail.ru*

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF ADSORPTION OF ETHYLHYDROSILOXANE ON THE SURFACE OF TUNGSTEN CARBIDE

Abstract. The article deals with the modification of the surface of tungsten carbide powder with ethylhydrosiloxane. The morphology and granulometric composition of the original tungsten carbide have been studied. To modify the powder, the oligomer is preliminarily dissolved in n-hexane. It is found that the adsorption equilibrium is established in the first hour. Based on the data obtained, an adsorption isotherm of oligomeric ethylhydrosiloxane molecules on tungsten carbide particles is plotted as a function of the equilibrium concentration. It has been established that the adsorption isotherm of oligomeric ethylhydrosiloxane molecules on tungsten carbide particles has a typical character of monomolecular (monolayer) adsorption. At an equilibrium concentration of 0.12 mg/cm^3 , the adsorption isotherm curve reaches a plateau. Data on the determination of the parameters of adsorption of oligomeric molecules of ethylhydrosiloxane on the surface of tungsten carbide are presented: the landing area occupied by one oligomer molecule and the thickness of the adsorption

layer of the oligomer. It is shown that modification with ethylhydrosiloxane leads to a transition from a hydrophilic to a hydrophobic surface. To establish the hydrophobization of the surface of tungsten carbide after modification with ethylhydrosiloxane, authors determine the contact angles of surface wetting before and after modification. At oligomer concentrations above 0.12 mg/cm^3 , the contact angle of wetting the surface of tungsten carbide with water has a maximum value of $96 \pm 2^\circ$.

Keywords: modification, adsorption, tungsten carbide, composite material, adsorption layer thickness, hydrophobization.

REFERENCES

1. Singh A.P., Gupta B.K., Mishra M., Govind M., Chandra A., Mathur R.B., Dhawan S.K. Multi-walled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties. *Carbon*. 2013. Vol. 56. Pp. 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.081>
2. Kolpachkov E.D., Kurnosov A.O., Petrova A.P., Raskutin A.E. Hybrid polymer composite materials for aviation based on fibrous fillers (Review) [Gibridnye polimernye kompozicionnye materialy dlya aviatsii na osnove voloknistykh napolnitelej (Obzor)]. *Questions of materials science*. 2020. Vol. 1(101). Pp. 126–138. (rus) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-101-1-126-138>
3. Arora G.S., Saxena K.K., Mohammed K.A., Prakash C., Dixit S. Manufacturing Techniques for Mg-Based Metal Matrix Composite with Different Reinforcements. *Crystals*. 2022. Vol. 12, 945. <https://doi.org/10.3390/cryst12070945>
4. Zhantlessova S., Savitskaya I., Kistabayeva A., Ignatova L., Talipova A., Pogrebnyak A., Digel I. Advanced “Green” Prebiotic Composite of Bacterial Cellulose/Pullulan Based on Synthetic Biology-Powered Microbial Coculture Strategy. *Polymers*. 2022. Vol. 14, 3224. <https://doi.org/10.3390/polym14153224>
5. Micheli D., Apollo C., Pastore R., Morles R.B., Laurenzi S., Marchetti M. Nanostructured composite materials for electromagnetic interference shielding applications. *Acta Astronautica*. 2011. Vol. 69. Is. 9–10. Pp. 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.06.004>
6. Balinova Yu.A., Grashchenkov D.V., Shavnev A.A., Babashov V.G., Chainikova A.S., Kurbatkina E.I., Bolshakova A.N. High-temperature heat-shielding, ceramic and ceramic-metal composite materials for a new generation of aircraft [Vysokotemperaturnye teplozashchitnye, keramicheskie i metallokeramicheskie kompozicionnye materialy dlya aviacionnoj tekhniki novogo pokoleniya]. *Bulletin of the Concern VKO "Almaz-Antey"*. 2020. No 2. Pp. 83–92. (rus) <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-83-92>
7. Sheichenko M.S., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu. Modern composite radiation-protective materials for building purposes [Sovremennye kompozicionnye radiacionno-zashchitnye materialy stroitel'nogo naznacheniya]. *Bulletin of BSTU* named after V. G. Shukhov. 2017. No 5. Pp. 15–19. (rus) https://doi.org/10.12737/article_590878fa94e168.59204031
8. Mayank, Bardenhagen A., Sethi V., Gudwani H. Spider-silk composite material for aerospace application. *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 193. Pp 704–709. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.08.013>
9. Zaichenko N.M., Nefedov V.V. Poly (ethylene terephthalate) composite material with modified fly ash filler. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 101(1). Article No. 10103. <https://doi.org/10.34910/MCE.101.3>
10. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Silicate autoclave materials using nanosized raw materials [Silikatnye avtoklavnye materialy s ispol'zovaniem nanodispersnogo syr'ya]. *Building materials*. 2008. No 11. Pp. 42–44. (rus)
11. Yanovsky Yu.G., Kozlov G.V., Karnet Yu.N. Fractal description of significant nanoeffects in the medium of polymer composites with nanosized fillers. Aggregation, interfacial interactions, amplification [Fraktal'noe opisanie znachimykh nanoeffektov v srede polimernykh kompozitov s nanorazmernymi napolnitelyami. Agregaciya, mezhfaznye vzaimodejstviya, usilenie]. *Physical mesomechanics*. 2012. No 15. Pp. 21–34. (rus)
12. Kozlov G.V., Mirzoev R.S., Lipatov Y.S. Aggregation of Filler Particles in Polymer Composites. An Analysis within the Framework of Irreversible Aggregation Models. *Mechanics of Composite Materials*. 2022. Vol. 38. C. 169–174. <https://doi.org/10.1023/A:1014989712013>
13. Dorigato A., Dzenis Y., Pegoretti A. Filler aggregation as a reinforcement mechanism in polymer nanocomposites. *Mechanics of Materials*. 2013. Vol. 61. Pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.02.004>
14. Vezentsev A.I., Krivenko Yu.Yu. Hydrophobization of fine chalk [Gidrofobizaciya tonkodispersnogo mela]. *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2021. No 6. Pp. 63–70. (rus) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-6-63-70>
15. Le P.T., Nguyen K.T. Hydrophobizing cellulose surfaces via catalyzed transesterification reaction using soybean oil and starch. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Is. 11. e05559. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05559>

16. Chen H., Wang R., Qian L., Ren Q., Jiang X., Zhu M. Dental Restorative Resin Composites: Modification Technologies for the Matrix/Filler Interface. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2018. Vol. 303. Is.10, 1800264. <https://doi.org/10.1002/mame.201800264>

17. Beloborodov I.I., Sukhostavets S.V. Modification of Powder Fillers in Order to Improve Operating Properties of Composite Polymer-Based Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2004. Vol. 43. Pp. 219–222. <https://doi.org/10.1023/B:PMMC.0000042453.83818.0a>

18. Sandomierski M., Okulus Z., Voelkel A. Active diazonium-modified zeolite fillers for methacrylate-based composites. *Composite Interfaces*. 2019. Vol. 26:7. Pp. 643–657. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1526564>

19. Ikaev A.M., Mingalyov P.G., Lisichkin G.V. Chemical modification of iron oxide surface with organosilicon and organophosphorous compounds. *Colloid Journal*. 2007. Vol. 69. Pp. 741–746. <https://doi.org/10.1134/S1061933X07060105>

20. Glazunova I.V., Tishchenko Yu.V., Filonenko Yu.Ya., Petukhova G.A., Gubkina M.L. Modification of natural kaolinite of the Lukoshkinsky deposit of the Lipetsk region with chlorine-containing organosilicon compounds [Modificirovanie prirodnogo kaolinita Lukoshkinskogo mestorozhdeniya Lipeckoj oblasti hlorsoderzhashchimi kremnijorganichesкими soedineniyami]. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2006. Vol. 49 Is. 11. Pp. 63–67. (rus)

21. Pat. EP 3138932 A1 Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron or submicron range; Publication EP 3138932 A1 20170308 (DE); Application; EP 15002564 A 20150901; Priority EP 15002564 A -20150901

22. Doroszkowski A. 6 - The physical chemistry of dispersion: Book chapter in *Paint and Surface Coatings*, Editors R. Lambourne, T.A. Strivens. 1999. Woodhead Publishing Limited. Pp. 198–242.

Information about the authors

Pavlenko, Vyacheslav I. DSc, Professor E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kashibadze, Vitaly V. Postgraduate student. E-mail: vitaliy.kashibadze@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Romanyuk, Dmitry S. Postgraduate student. E-mail: romanyuk.dmitrij.98@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sidelnikov, Roman V. Research laboratory assistant. E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Domarev, Semyon N. Research engineer. E-mail: domarev542@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.08.2022

Для цитирования:

Павленко В.И., Кашибадзе В.В., Романюк Д.С., Сидельников Р.В., Домарев С.Н. Исследование параметров адсорбции этилгидросилоксана на поверхности карбида вольфрама // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 90–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-90-98

For citation:

Pavlenko V.I., Kashibadze V.V., Romanyuk D.S., Sidelnikov R.V., Domarev S.N. Investigation of the parameters of adsorption of ethylhydrosiloxane on the surface of tungsten carbide. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 90–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-90-98

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107

Баимур К.А., Петровский Э.А.Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа***E-mail: bashmur@bk.ru*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЯЧЕИСТОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. Целью работы является исследование цилиндрических поверхностей деталей с рельефом, отличительной особенностью которого является ячеистая форма, представляющая собой эллиптический параболоид с неравными положительными параметрами. Гипотеза исследования состоит в высоком потенциале использования ячеистого рельефа, связанным со снижением приработочного износа технологических агрегатов, при обеспечении формой рельефа гидродинамической несущей способности смазочного слоя. Задачи исследования свелись к параметрическому анализу поведения смазочного слоя в зазоре с ячейкой рельефа при помощи построения аналитической модели, основанной на теории гидродинамической смазки, а также компьютерного гидродинамического моделирования (CFD) в программном обеспечении ANSYS Fluent, где для замыкания уравнений переноса была принята модель турбулентности SST $k-\omega$. Выявлено, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при глубине ячейки 0,128 мм и приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки, что показали обе модели, чем верифицирована их приемлемая точность. Также вычислено максимальное подъемное гидродинамическое давление на одной ячейке, составившее 3 кПа. По результатам параметрического анализа можно констатировать существенный потенциал использования ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей.

Ключевые слова: ячеистый рельеф, фрикционный износ, цилиндро-поршневая группа, гидродинамическая модель, ANSYS Fluent, двухмерный параметрический анализ, математическая модель.

Введение. Эксплуатация технологических агрегатов показывает, что трущиеся поверхности их деталей зачастую работают с недостаточной смазкой, что приводит к образованию зазубрин, захвату и заеданию трущихся поверхностей этих деталей [1]. Таким образом, двигатели, насосы и компрессоры часто страдают от износа трущихся пар, к которым относятся: гильза цилиндра – поршневое кольцо; вал – подшипник скольжения; поршневой палец – шатун и другие [2]. Тяжелое трибологическое состояние оказывает большое влияние на надежность трущихся пар и их эксплуатационные свойства. Известно, что в поршневых агрегатах наиболее энергоемким по критерию механических потерь и высоко изнашиваемым сопряжением является пара цилиндр – поршневое кольцо. В частности, обзор литературы показывает, что около 45 % механических потерь в автомобильных двигателях приходится на трение в цилиндро-поршневой группе [3]. В результате действия высокой температуры и давления в области упомянутых пар трения, обнаруживается их сложный механизм износа, связанный с адгезионным, абразивным и другими его видами, что обнаруживает склонность данных пар трения и агрегатов к отказам [4]. Отказы агрегатов могут привести к авариям и значительным экономическим потерям [5].

Возможности конструктивных изменений для улучшения подачи смазки на трущиеся поверхности без усложнения конструкции агрегатов практически исчерпаны или экономически нецелесообразны. Одно из немногочисленных возможных решений заключается в улучшении удержания смазки на трущихся поверхностях [6]. Осуществление данного решения известно и заключается в оптимизации рельефа рабочих поверхностей трущихся деталей с использованием различных технологий его нанесения, предоставляющих практически неограниченные средства управления всеми геометрическими параметрами формируемого рельефа поверхности [7, 8]. При приближении рабочего органа, например, поршневого кольца, к элементу рельефа давление смазки в нем сначала падает, а затем повышается, что создает перепад давления на элементе и формирует его несущую способность. Одним из преимуществ данного метода является возможность его осуществления во время ремонта оборудования, например, пластинированием цилиндрической поверхности детали [9].

Моделирование геометрии поверхности привлекает всё большее внимание, поскольку изменением геометрии поверхности можно сравнительно просто улучшить трибологические характеристики пар трения. Исследование различных

геометрических форм рельефа и их трибологических свойств имеет как теоретическое значение, так и прикладную перспективу для проектирования и получения соответствующей геометрической морфологии [10]. Для изучения трения между поршнем (поршневым кольцом) и гильзой цилиндра путем чередования геометрии поверхности были разработаны различные модели. В частности, исследователи отмечают [11, 12], что смазывающий эффект был лучше, когда поршневое кольцо имело правильную микроструктуру в виде ямочного рельефа параболического профиля, а его доля в площади поверхности составляла 15 %.

Циклическая форма движения рабочего органа агрегата способствует постепенному износу любой заданной формы рельефа в области его периферии вдоль движения органа ввиду образования зон повышенных контактных давлений. Это приводит к вырождению изначального рельефа, как отмечается опытом эксплуатации и экспериментальными исследованиями [6, 13], в ячеистую форму, то есть вырождением параболоида вращения в эллиптический параболоид с неравными положительными параметрами. Таким образом, в процессе приработки и работы агрегата имеет место существенное выкрашивание материала, вызывающего потерю проектных эксплуатационных свойств рельефа и цилиндрической поверхности, вторичное выкрашивание и другие негативные следствия. Экспериментально установлено, что проектно эллиптическая форма рельефа способствует уменьшению приработочного износа [13]. При этом об эксплуатационных свойствах цилиндрических поверхностей с ячеистым рельефом информации в известной литературе не обнаружено. Эксплуатационные свойства поверхности с рельефом обеспечиваются прежде всего той гидродинамикой смазочного слоя – гидродинамической несущей способностью, которая возникает посредством формы рельефа.

Исходя из вышесказанного, целью настоящего исследования является анализ эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей с ячеистым рельефом. Таким образом, выделены следующие задачи исследования: создание аналитической и компьютерной гидродинамической моделей (CFD) поведения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы, их анализ и сопоставление результатов.

Аналитическая модель. Теория гидродинамической смазки основывается на дифференциальном уравнении Рейнольдса [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu v \frac{dh}{dx} + 12\mu U, \quad (1)$$

где x, y – координаты в направлении по касательной к внутренней поверхности расточки подшипника и по толщине смазочного слоя; $p = p(x, y)$ – давление в смазочном слое; v – проекция скорости поверхности трения на ось x ; U – скорость сближения поверхностей трения; μ – динамическая вязкость жидкости; $h(x)$ – функция толщины смазочного слоя.

Допустив, что движение по координате y отсутствует и давление вдоль нее не изменяется, уравнение (1) примет вид [15]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\mu v \frac{dh}{dx}. \quad (2)$$

Его интеграл:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu v \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (3)$$

где h – высота зазора; h_0 – высота зазора, при которой градиент давления по длине зазора $dp/dx = 0$ и $p = \max$.

Следуя методике, представленной в [16] с учетом (2) и расчетной схемы на Рисунке 1, получили выражение (4), описывающее распределение гидродинамического давления масла для произвольной (интегрируемой) функции толщины смазочного слоя $h(x)$ на длине L :

$$p(x) = 6\mu v \left[\frac{\int_0^L \frac{dx}{h^2(x)}}{\int_0^L \frac{dx}{h^3(x)}} \int_0^x \frac{dx}{h^3(x)} - \int_0^x \frac{dx}{h^2(x)} \right] \quad (4)$$

Опираясь на рисунок 1, составим уравнения, описывающие в безразмерной форме профиль зазора. Для облегчения задачи, так как размеры достаточно малы, примем, что функция толщины смазочного слоя будет линейной, тогда $h(x)$ будет описываться системой уравнений:

$$h(x) = \begin{cases} \frac{xh_p}{l} + h_0, & x \in [0; l]; \\ -\frac{xh_p}{l} + h_0, & x \in [l; L]. \end{cases} \quad (5)$$

где $l = L/2$.

Подставляя полученные выражения интегралов в выражение (4), получим систему уравнений, описывающую распределение гидродинамического давления масла в зазоре по двум участкам профиля:

$$p(x) = 6\mu v \begin{cases} \frac{h_p l x(l-x)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + h_p x)^2}, & x \in [0; l]; \\ \frac{h_p l(2l^2 - 3lx + x^2)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + 2h_p l - h_p x)^2}, & x \in [l; L]. \end{cases} \quad (6)$$

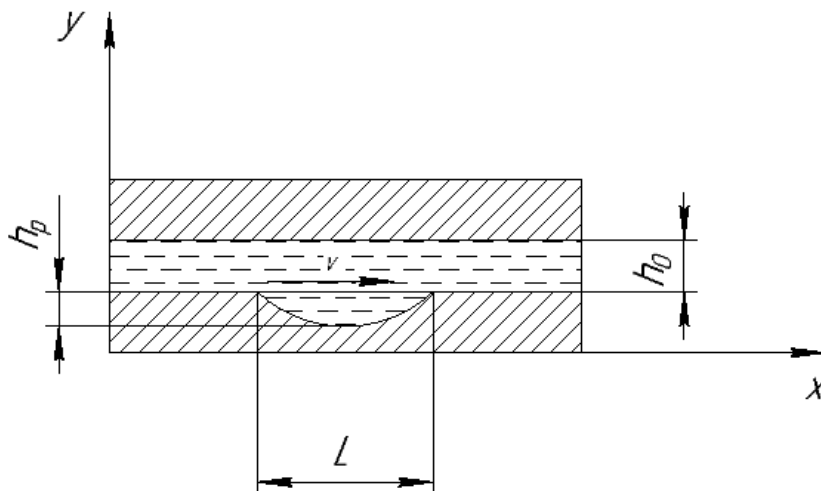


Рис. 1. Расчетная схема эллиптической ячейки

Найдем погонную (отнесенную к единице ширины) гидродинамическую несущую способность P_n эллиптической ячейки. Так как профиль зазора симметричен, то будет достаточно найти несущую способность для половины профиля.

Проинтегрируем выражение (6) по переменной x в пределах от 0 до l и после элементарных преобразований получим выражение несущей способности для половины профиля эллиптической ячейки:

$$\begin{aligned} P_n &= 6\mu v \int_0^l \frac{h_p l x(l-x)}{(2h_0 + h_p)(h_0 l + h_p x)^2} dx = \\ &= 6\mu v \frac{l^2 \left(2h_p - 2h_0 \ln \left(\frac{l(h_0 + h_p)}{h_p} \right) - h_p \ln \left(\frac{l(h_0 + h_p)}{h_p} \right) + 2h_0 \ln \left(\frac{lh_0}{h_p} \right) + h_p \ln \left(\frac{lh_0}{h_p} \right) \right)}{h_p^2 (2h_0 + h_p)} \end{aligned} \quad (7)$$

Для поршней в цилиндрах компрессоров согласно ГОСТ 25347-2013 и [17] предпочтительно применение ходовой посадки H7/f7. Для цилиндрического соединения диаметром 280 мм имеем: верхнее отклонение цилиндра – +0,052 мм, нижнее – 0; верхнее отклонение поршневого кольца – -0,056, нижнее – -0,108 мм. Поле допусков системы цилиндр-поршень представлено на рис. 2.

В качестве зазора h_0 примем средний зазор S_c , тогда $h_0 = 0,108$ мм.

Методология CFD-анализа. Геометрические параметры эллиптической ячейки (табл. 1), необходимые для проведения компьютерного гидродинамического моделирования, были взяты

из вышеприведенной математической модели. Вид расчетной области представлен на рисунке 3 и построен посредством программного продукта SolidWorks.

Таблица 1

Геометрические параметры ячейки

Параметр	Значение
Максимальная глубина ячейки, мм	0,260
Размер малой оси эллипса, мм	3,78
Размер большой оси эллипса, мм	8,0
Высота зазора, мм	0,108

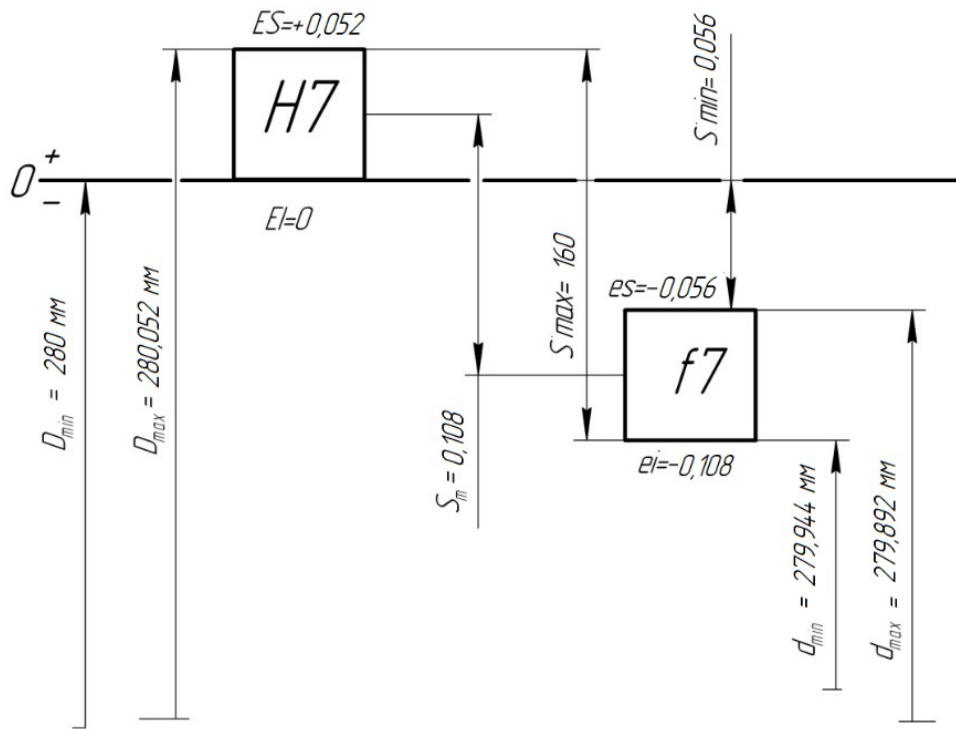


Рис. 2. Схема расположения полей допусков

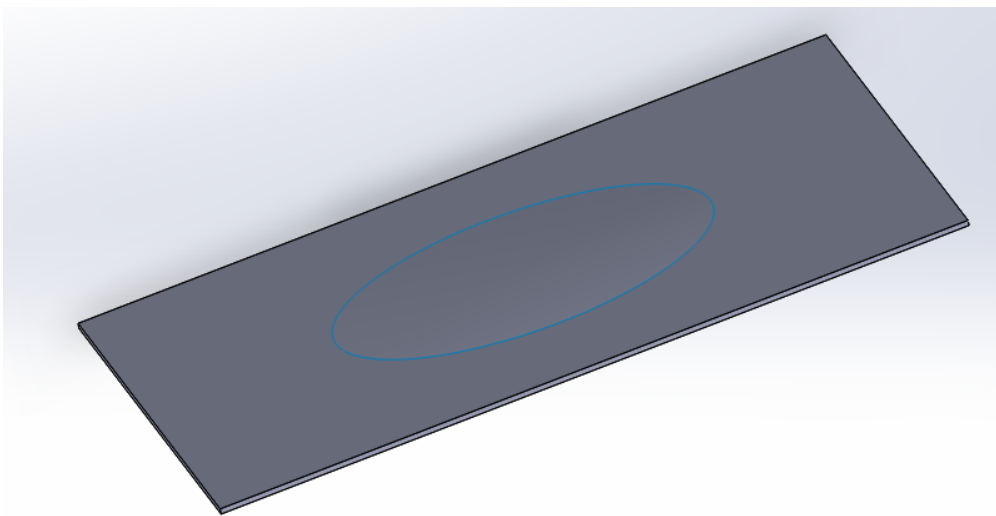


Рис. 3. 2D геометрия расчетной области

Все вычисления проводились на основе метода конечных объемов с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Метод основан на схеме второго порядка точности, для решения уравнений переноса как для ламинарной, так и для турбулентной моделей. Для замыкания уравнений была принята модель турбулентности Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$. Эта модель обеспечивает более высокую точность и надежность прогнозирования течений вблизи стенок, так как учитывает перенос турбулентных касательных напряжений и обеспечивает точные прогнозы потока для случаев с неблагоприятными градиентами давления, связанных с отрывом потока. Подробное описание используемой модели

SST $k-\omega$ и уравнений переноса представлено в [18]

Была создана расчетная сетка. Ее калибровка производилась на основе анализа чувствительности, основанного на независимости размера сетки. Уточнение проводилось до тех пор, пока результаты не стали сопоставимы значениям, полученным в математической модели. Использовались четырехугольные элементы с уплотненным размером ячеек от 0,03 мм в ячейке до 0,04 мм в остальной части сетки. Общее количество элементов – 36190.

Заданы свойства рабочей жидкости (масла): вязкость – 10 мм²/с, плотность – 800 кг/м³.

Были заданы граничные условия на заранее подготовленных при построении сетки гранях. Так как мы приняли нулевые граничные условия, то давление на входе и выходе принято равным нулю. Верхняя граница имитирует стенку гильзы цилиндра, поэтому мы задаем стенку неподвижной. Нижняя граница имитирует поршневое кольцо, поэтому мы задали ей скорость – 1 м/с.

Результаты. Как показывают исследования [16], максимальную несущую способность при

прочих равных условиях обеспечил микрорельеф с соизмеримым по отношению к заданной осевой высоте поршневого кольца шагом. Таким образом, примем, что $l = 8$ мм.

Подставим значения в выражение (7) и получим зависимость погонной гидродинамической несущей способности смазки от текущей глубины эллиптической ячейки. График зависимости представлен на рисунке 4.

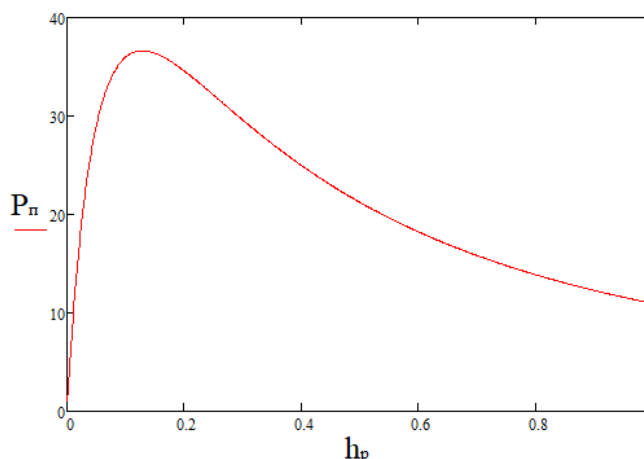


Рис. 4. Зависимость погонной гидродинамической несущей способности смазки от текущей глубины h_p эллиптической ячейки

Из рисунка 4 видно, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при $h_p = 0,128$ мм.

Чтобы проверить действительно ли микрорельеф с соизмеримым по отношению к заданной

осевой высоте поршневого кольца шагом обеспечивает максимальную гидродинамическую несущую способность, представим зависимость несущей способности от двух переменных h_p и $l/2$ (рис. 5).

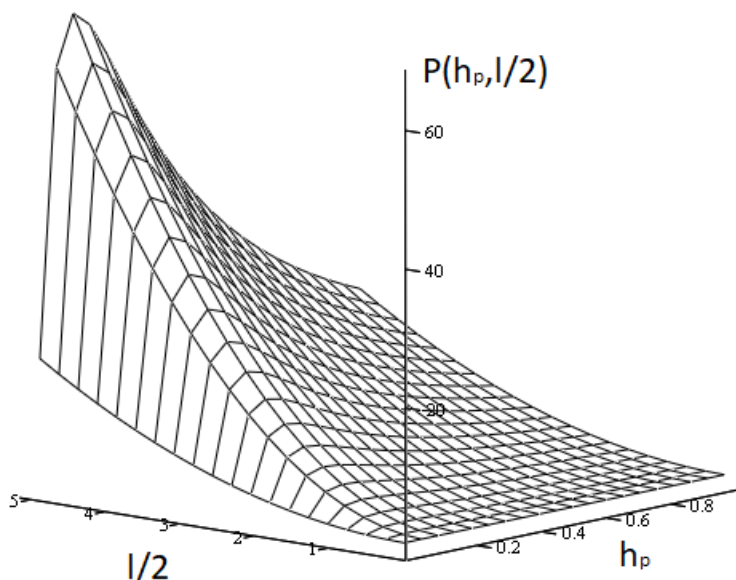


Рис. 5. Зависимость погонной гидродинамической несущей способности от текущих глубины h_p и длины $l/2$ эллиптической ячейки

Как видно из рисунка 5, максимальная погонная гидродинамическая несущая способность смазки будет при $l/2 = 4$ мм. Задавать это значение большим нельзя, так как это приведет к

уменьшению степени сжатия поршневого компрессора.

Визуально распределение гидродинамической нагрузочной способности смазки в зазоре с эллиптической ячейкой показано на рис. 6.

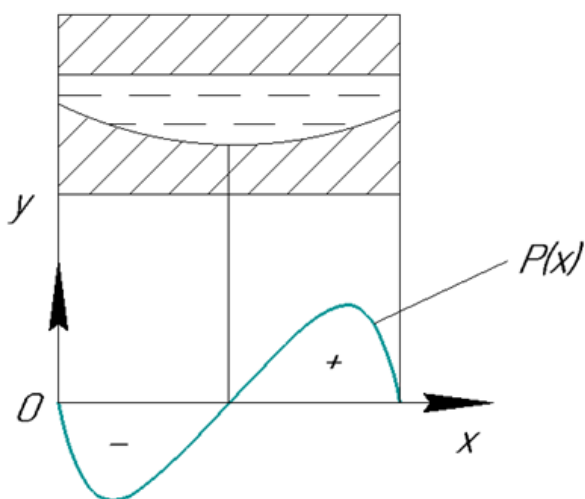


Рис. 6. Распределение гидродинамической нагрузочной способности смазки в зазоре с эллиптической ячейкой

Как видно из рисунка 6, на первой половине участка гидродинамическая нагрузочная способность $P(x)$ нелинейно уменьшается, а потом возрастает до 0. Это происходит ввиду того, что высота зазора увеличивается в направлении движения. Затем следует уменьшение зазора, что приводит к увеличению нагрузочной способности. Максимум нагрузочной способности приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки, после чего уменьшается до 0.

Посредством программного обеспечения ANSYS Fluent при помощи функции контур можем получить распределение давления в смазочном слое, которое показано на рисунке 7. Для большей наглядности выставлено 100 контуров. Наложенная бирюзовая кривая линия на рисунке 7 иллюстрирует результаты распределения нагрузочной способности с аналитической модели.

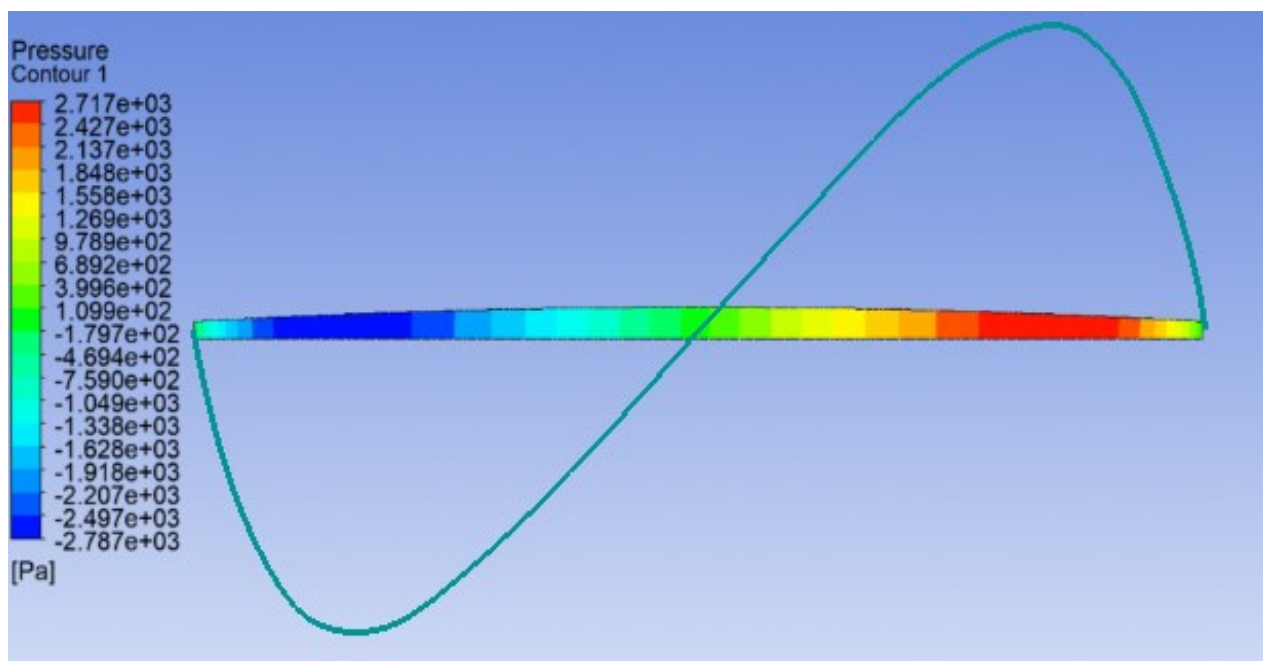


Рис. 7. Эпюра распределения гидродинамического давления масла в зазоре с эллиптической ячейкой

Сопоставляя результаты CFD-модели с аналитическим решением, можем сделать вывод об адекватности полученного результата. Так как мы принимали нулевые граничные условия, то давление на входе и выходе, а также в центральной зоне ячейки принимает нулевые значения. Расположение максимума и минимума давления смазочного слоя так же сходится с аналогичными данными по нагрузочной способности, полученной с аналитической модели, что наглядно видно на рисунке 7. Численные результаты показывают, что ячеистый рельеф с эллиптической формой, нанесенный на гильзу, потенциально может снизить износ поршневого кольца, так как одна ячейка обеспечивает дополнительное подъемное гидродинамическое давление в ~ 3 кПа. При этом

вопрос о геометрических параметрах ячейки эллиптического типа, обеспечивающей наибольшую нагрузочную способность, планируется раскрыть в дальнейших работах, как и вопрос о технологии формирования поверхностей с ячеистым рельефом.

Выводы.

1. Выдвинута гипотеза о высоком потенциале использования ячеистого рельефа эллиптической формы для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей при снижении приработочного износа технологических агрегатов.

2. Получена основанная на теории гидродинамической смазки аналитическая модель пове-

дения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы.

3. При помощи программного обеспечения ANSYS Fluent получена компьютерная гидродинамическая модель (CFD) поведения смазочного слоя на цилиндрической поверхности с ячеистым рельефом эллиптической формы.

4. Аналитическая модель показала, что максимальная гидродинамическая несущая способность возникает при глубине ячейки 0,128 мм, что приходится на 21/25 часть большой оси эллипса ячейки.

5. Посредством гидродинамической CFD-модели вычислено подъемное гидродинамическое давление на одной ячейке, составившее ~3 кПа.

6. Расположение максимума и минимума давления смазочного слоя по ячейке сходится с аналогичными данными по нагрузочной способности, полученной с аналитической модели, что говорит о приемлемой точности моделей.

7. По результатам исследования можно констатировать существенный потенциал использования ячеистого рельефа эллиптической формы для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей. При этом требуются дополнительные исследования ячеистого рельефа как в области оптимальных геометрических параметров ячеек, так и в технологии его формирования.

Источник финансирования. Исследование поддержано стипендиальной программой Совета по грантам при Президенте Российской Федерации, проект СП-1051.2022.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнейдер Ю.Г., Гузок Я.В. Влияние микрорельефа трущихся пар герметичных холодильных компрессоров на их долговечность // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1973. № 5. С. 30–32.

2. Guo Z., Yuan C., Liu P. Peng Z., Yan X. Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner-piston ring components // Tribology letters. 2013. № 51. Pp. 9–23. doi: 10.1007/s11249-013-0141-y.

3. Taylor C.M. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability // Wear. 1998. № 221(1). Pp. 1–8. doi: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.

4. Dokshanin S.G., Tynchenko V.S., Bukhtoyarov V.V., Bashmur K.A., Kukartsev V.V. Investigation of the tribological properties of ultrafine diamond-graphite powder as an additive to greases //

IOP conference series: materials science and engineering. 2019. № 560. 012192. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012192.

5. Bukhtoyarov V.V., Zyryanov D.K., Bukhtoyarova N.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.V., Bashmur K.A. Expert analysis of elements of the diagnostic system for compressor technological equipment // Journal of physics: conference series. 2019. № 1399. 044113. doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044113.

6. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом : монография. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.

7. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units // Journal of physics: conference series. 2019. № 1399. 055032. doi: 10.1088/1742-6596/1399/5/055032.

8. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Федоренко Т.М. Исследование обеспечения необходимой шероховатости поверхности крупногабаритных вращающихся деталей приставными станочными модулями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 35–38.

9. Соболев Н.И., Титулин Б.А. Пластинирование деталей машин : монография. Л.: Машиностроение, 1987. 224 с.

10. Zhao W., Wang L., Xue Q. Influence of micro/nano-textures and chemical modification on the nanotribological property of Au surface // Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects. 2010. № 366(1–3). Pp. 191–196. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.06.006.

11. Liu C., Lu Y.-J., Zhang Y.-F., Li S., Müller N. Numerical study on the lubrication performance of compression ring-cylinder liner system with spherical dimples // PLoS ONE. 2017. № 12(7). e0181574. doi: 10.1371/journal.pone.0181574.

12. Zhang Y., Zeng L., Wu Z., Ding X., Chen K. Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston // Micro & nano letters. 2019. № 14(4). Pp. 424–429. doi: 10.1049/mnl.2018.5535.

13. Петровский Д.Э., Петровский Э.А. Инструментальные ротационные модули для обработки деталей технологических машин : монография. Старый Оскол : ТНТ, 2017. 196 с.

14. Захаров С.М. Гидродинамическая смазка: состояние и перспективы // Трение и износ. 2010. № 31(1). С. 78–92.

15. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники : учебник для вузов. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.

16. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний : учебное пособие. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 288 с.

17. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник в 2 ч.: ч.1. СПб : Политехника, 2001. 576 с.

<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm> (дата обращения 15.06.2022).

18. ANSYS Fluent Theory Guide. Системные требования: Интернет браузер. URL:

Информация об авторах

Башмур Кирилл Александрович, старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса. E-mail: bashmur@bk.ru. Институт нефти и газа Сибирского федерального университета. Россия, 660041, Красноярск, Свободный просп., д. 82, стр. 6.

Петровский Эдуард Аркадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Институт нефти и газа Сибирского федерального университета. Россия, 660041, Красноярск, Свободный просп., д. 82, стр. 6.

Поступила 28.07.2022 г.

© Башмур К.А., Петровский Э.А., 2022

***Bashmur K.A., Petrovsky E.A.**

Siberian Federal University

**E-mail: bashmur@bk.ru*

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF CELL RELIEF TO PROVIDE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CYLINDRICAL SURFACES OF TECHNOLOGICAL UNITS

Abstract. The work is aimed to study the cylindrical surfaces of parts with a cellular shape surfaces, which is an elliptical paraboloid with unequal positive parameters. The hypothesis of the study is the high potential of using a cellular relief, associated with a decrease in the running-in wear of technological units, while providing the hydrodynamic bearing capacity of the lubricating layer with the shape of the relief. The objectives of the study are reduced to a parametric analysis of the behavior of the lubricating layer in a gap with a relief cell using the construction of an analytical model based on the theory of hydrodynamic lubrication. In addition, the computer fluid dynamic simulation in the ANSYS Fluent software, where the SST turbulence model is adopted to close the transport equations $k-\omega$. It is found that the maximum hydrodynamic bearing capacity occurs at a cell depth of 0.128 mm and falls on 21/25 of the major axis of the cell ellipse. It is shown by both models, which verified their acceptable accuracy. The maximum lifting hydrodynamic pressure on one cell is also calculated, which amounted to 3 kPa. The results of parametric analysis state a significant potential for using a cellular relief to ensure the operational properties of cylindrical surfaces.

Keywords: cell relief, frictional wear, cylinder-piston group, hydrodynamic model, ANSYS Fluent, two-dimensional parametric analysis, mathematical model.

REFERENCES

1. Shneider Yu.G., Guzik Ya.V. Influence of the microrelief of rubbing pairs of hermetic refrigeration compressors on their durability [Vliyaniye mikrorel'yefa trushchikhsya par germetichnykh kholodil'nykh kompressorov na ikh dolgovechnost']. Chemical and petroleum engineering. 1973. No. 5. Pp. 30–32. (rus)

2. Guo Z., Yuan C., Liu P. Peng Z., Yan X. Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner-piston ring components. Tribology letters. 2013. Vol. 51. Pp. 9–23. doi: 10.1007/s11249-013-0141-y.

3. Taylor C.M. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability. Wear. 1998. Vol. 221(1). Pp. 1–8. doi: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.

4. Dokshanin S.G., Tynchenko V.S., Bukhtoyarov V.V., Bashmur K.A., Kukartsev V.V. Investigation of the tribological properties of ultrafine diamond-graphite powder as an additive to greases. IOP conference series: materials science and engineering. 2019. Vol. 560. 012192. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012192.

5. Bukhtoyarov V.V., Zyryanov D.K., Bukhtoyarova N.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.V., Bashmur K.A. Expert analysis of elements of the diagnostic system for compressor technological equipment. Journal of physics: conference series. 2019. Vol. 1399. 044113. doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044113.

6. Shneider Yu.G. Operational properties of parts with a regular microrelief [Ekspluatatsionnyye svoystva detaley s regul'yarnym mikrorel'yefom]. L.: Mashinostroyeniye, 1982. 248 p. (rus)

7. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. Journal of physics: conference series. 2019. Vol. 1399. 055032. doi: 10.1088/1742-6596/1399/5/055032.
8. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Fedorenko T.M. Investigation of providing the necessary surface roughness of large-sized rotating parts with attached machine modules [Issledovaniye obespecheniya neobkhodimoy sherokhovatosti poverkhnosti krupnogabaritnykh vrashchayushchikhsya detaley pristavnymi stanochnymi modulyami]. Bulletin of BG TU named after V. G. Shukhov. 2008. No. 2. Pp. 35–38. (rus)
9. Sobolev N.I., Titunin B.A. Plastination of machine parts [Plastinirovaniye detaley mashin]. L.: Mashinostroyeniye, 1987. 224 p. (rus)
10. Zhao W., Wang L., Xue Q. Influence of micro/nano-textures and chemical modification on the nanotribological property of Au surface. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects. 2010. Vol. 366(1–3). Pp. 191–196. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.06.006.
11. Liu C., Lu Y.-J., Zhang Y.-F., Li S., Müller N. Numerical study on the lubrication performance of compression ring-cylinder liner system with spherical dimples. PLoS ONE. 2017. Vol. 12(7). e0181574. doi: 10.1371/journal.pone.0181574.
12. Zhang Y., Zeng L., Wu Z., Ding X., Chen K. Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. Micro & nano letters. 2019. Vol. 14(4). Pp. 424–429. doi: 10.1049/mnl.2018.5535.
13. Petrovsky D.E., Petrovsky E.A. Rotary tool modules for processing parts of technological machines [Instrumental'nyye rotatsionnyye moduli dlya obrabotki detaley tekhnologicheskikh mashin]. Stary Oskol: TNT, 2017. 196 p. (rus)
14. Zakharov S.M. Hydrodynamic lubrication: state and prospects [Gidrodinamicheskaya smazka: sostoyaniye i perspektivy]. Friction and wear. 2010. No. 31(1). Pp. 78–92. (rus)
15. Dotsenko A.I., Buyanovsky I.A. Fundamentals of tribology [Osnovy tribotekhniki]. M.: INFRA-M, 2014. 336 p. (rus)
16. Putintsev S.V. Mechanical losses in reciprocating engines: special design, calculation and testing chapters [Mekhanicheskiye poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nyye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy]. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 288 p. (rus)
17. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. Tolerances and landings : part 1. SPb.: Politehnika, 2001. 576 p. (rus)
18. ANSYS Fluent Theory Guide [Electronic resource]. System requirements: Internet browser. URL: <https://www.afs.enea.it/project/nep-tunius/docs/fluent/html/th/node67.htm> (date of treatment 15.06.2022).

Information about the authors

Bashmur, Kirill A. Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Technological Machines and Equipment. E-mail: bashmur@bk.ru. Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodnyy prosp., 82/6.

Petrovsky, Eduard A. Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Oil and Gas Technological Machines and Equipment. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodnyy prosp., 82/6.

Received 28.07.2022

Для цитирования:

Башмур К.А., Петровский Э.А. Технологические возможности ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей технологических агрегатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107

For citation:

Bashmur K.A., Petrovsky E.A. Technological capabilities of cell relief to provide the performance properties of cylindrical surfaces of technological units. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-99-107

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119

*Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: duyun77@mail.ru

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ADAMS-MATLAB

Аннотация. В статье представлены методика и результаты совместного моделирования движения параллельного манипулятора типа платформы Гью-Стюарта с использованием Adams-Matlab с целью проверки и отработки возможной траектории рабочего органа. Matlab Simulink применен для решения обратной задачи кинематики: определения длин выдвижения штоков по заданной траектории движения рабочего органа. Особенностью применения схемы Simulink является экспортирование физико-механических параметров твердотельной модели из Adams. Взаимная интеграция Matlab Simulink и Adams View обеспечивает реализацию совместного моделирования и позволяет выполнять кинематический, динамический и силовой анализ механизма с учетом его конструктивных особенностей посредством использования виртуального прототипа. Предложенная методика совместного моделирования представлена в виде подробного описания содержания блоков схемы Simulink, их взаимодействия в процессе моделирования, соответствующего математического аппарата и условий осуществления взаимной интеграции программных пакетов Matlab и Adams. Методика опробована на примере одного из конструктивных исполнений платформы при движении по нескольким характерным типам заданной траектории. Представлены результаты вычислительного эксперимента и выполнен анализ координатного соответствия фактической траектории, полученной в результате симуляции при совместном моделировании, с исходной заданной траекторией для различных типов движения.

Ключевые слова: манипуляторы параллельной структуры, виртуальный прототип, совместное моделирование, траектория движения, платформа Гью-Стюарта.

Введение. В настоящее время совместное моделирование (Co-simulation) стало мощным инструментом проектирования инженерных систем. Совместное моделирование заключается в применении комплекса специализированных программных пакетов и позволяет разработчикам исследовать различные аспекты системы, а также обеспечивает автоматическую оценку параметров гораздо большего числа конструктивных вариантов по сравнению с ручным методом проб и ошибок. Совместная симуляция – эффективный метод решения мультифизических задач.

Динамический анализ среды совместного моделирования обеспечивает визуальный вывод функциональных параметров изучаемой системы в реальном времени и позволяет проверить ее характеристики на виртуальном прототипе. При разработке системы управления это снижает потребность в прототипировании аппаратной части и последующем тестировании алгоритма управления. Совместное моделирование экономит материальные и временные затраты, дает возможность модифицировать конструктивные элементы в соответствии с требованиями пользователя до того, как будет выполнено изготовление.

Одной из актуальных задач, в рамках решения которой может быть использовано совместное моделирование, является исследование кинематики и динамики движения манипуляторов параллельной структуры. Это связано с тем, что в

связи с конструктивными особенностями, а именно наличием параллельных кинематических звеньев, недостатком этих механизмов является возможность интерференции (пересечения) отдельных кинематических цепей и как следствие возникновение особых положений, в которых может произойти потеря устойчивости. Кроме того, имеет место нелинейная зависимость кинематики и динамики механизма в зависимости от точки рабочей области, что приводит к анизотропии и неоднородности динамических, упругих и скоростных свойств. В связи с этим решение данных вопросов привлекает внимание многих исследователей [1–17].

Для изучения работы параллельных манипуляторов исследователи используют различные подходы и методы. Ряд исследователей применяет аналитический подход для решения прямой и обратной задач кинематики [1–8]. При этом прямая задача кинематики, заключающаяся в определении координат рабочего органа в зависимости от длин выдвижения штоков, не имеет четко формализованного решения и требует применения более сложных математических методов по сравнению с обратной задачей кинематики – определения длин выдвижения штоков по заданным координатам рабочего органа, решение которой в общем случае сводится к решению шести нелинейных уравнений для шестистепенных манипуляторов типа платформы Гью-Стюарта 6-6.

Математические подходы, применяемые для решения прямой задачи кинематики, можно условно разделить на две группы: использование аппарата векторной алгебры и аналитической геометрии. При использовании аппарата векторной алгебры координаты рабочего органа выражаются через орты подвижной системы координат посредством векторов, связывающих основание и подвижную платформу, или через составляющие матрицы поворота. При использовании аналитической геометрии конструкция представлена в виде геометрических соотношений пространственной конфигурации.

Функциональные характеристики современных программных средств открывают новые возможности изучения описанных выше вопросов, представим некоторые из них, исследуемые следующими авторами: моделирование геометрии и структурной конфигурации платформы Гью-Стюарта в среде Mathcad [9]; оптимизация угловых и линейных размеров манипуляторов параллельной кинематики с использованием комплекса MatLab/Simulink встроенного пакета с библиотекой визуального моделирования пространственных механизмов SimMechanics и высокоэффективного метода оптимизации SQP [10]; совершенствование пневматической системы управления платформой Стюарта на основе исследования динамических характеристик пневмопривода с использованием программных пакетов MatLab/Simulink и AMESim [11]; моделирование системы управления сервоприводами рычажной платформы Стюарта посредством решения задачи обратной кинематики в MatLab/Simulink с применением библиотеки MatLab/Simulink [12]; решение прямой и обратной задач управления кинематикой платформы Стюарта с использованием MatLab [13]. Как видно из перечисления, одним из популярных программных средств является MatLab. Представленная работа также использует данный пакет, при этом отличительной особенностью является совместное моделирование с Adams.

Основная часть. В данной работе предлагается использование совместного моделирования Adams-Matlab для отработки заданной траектории движения рабочего органа параллельного манипулятора и исследования силомоментных характеристик, возникающих в процессе движения. Этот вычислительный подход позволяет численно решать задачи кинематики, динамики и управления движением, а также значительно сократить аналитические и программные усилия. При использовании классических схем Simulink для моделирования движения механизма необходимо определение действующих сил и использование их в качестве входных параметров модели,

что в ряде случаев является отдельной, сложно выполнимой задачей. Одним из преимуществ совместного моделирования Adams-Matlab является возможность опустить данный шаг и подавать на вход модели не силовой, а кинематический параметр, например, величину выдвижения штока при моделировании движения параллельного манипулятора типа платформы Стюарта. Это возможно при использовании специальных функций Adams (Joint Motion), отвечающих за осуществление движения механизма.

Для реализации предлагаемого подхода необходимо выполнение следующих основных задач:

- создание виртуального прототипа в среде Adams;
- построение системы управления в Simulink;
- экспорт и интеграция физико-механических параметров твердотельной модели из Adams в систему управления, созданную в Simulink;
- проведение совместного моделирования Adams View-Matlab Simulink.

На рисунке 1 представлена схема Simulink, используемая для моделирования движения рабочего органа параллельного манипулятора. Рассмотрим подробнее функциональное назначение отдельных блоков. Блок Euler XYZ преобразует набор углов Эйлера в соответствующую матрицу поворота. Блок Inverse Kinematics Module предназначен для решения обратной задачи кинематики, генерируя на выходе необходимые длины выдвижения штоков. Блок Saturation имитирует физические ограничения на движение электроцилиндров, связанные с их конструктивным исполнением. Особенностью данной схемы является блок Adams_sub, экспортированный в Matlab из Adams. Блок Adams_sub содержит физико-механические параметры твердотельной модели, созданной в Adams, и позволяет визуализировать траекторию движения рабочего органа, а также определить необходимые силомоментные характеристики механизма. Интеграция этого блока обеспечивает процесс совместного моделирования Adams View-Matlab Simulink. Для правильной интеграции блока и реализации совместного моделирования необходимо задать входные и выходные параметры системы. В качестве входных параметров используются координаты заданной траектории движения рабочего органа, изменяющиеся во времени. За координату рабочего органа принята точка, расположенная в центре подвижной платформы. На выходе блока Adams_sub генерируются фактические координаты рабочего органа, учитывающие конструктивные параметры механизма и его физико-механические свойства. В случае несоответствия заданной

траектории движения реальным параметрам механизма, возникнет ошибка симуляции. Это может произойти, например, при возникновении пиковых силовых нагрузок, превышающих допустимые. Таким образом, реализация совместного моделирования позволяет проверять и обрабаты-

вать необходимые траектории движения, определенные в соответствии с функциональным назначением манипулятора. На рисунках 2–4 подробнее представлен состав структурных компонентов схемы Simulink, а именно блоков Euler XYZ и Invers Kinematics Module.

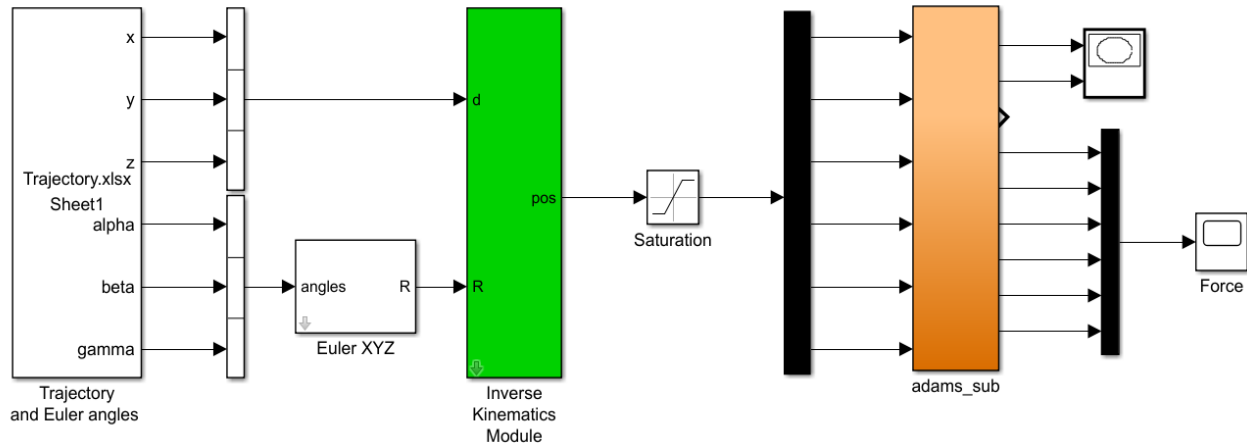


Рис. 1. Схема Simulink для обработки траектории движения рабочего органа параллельного манипулятора

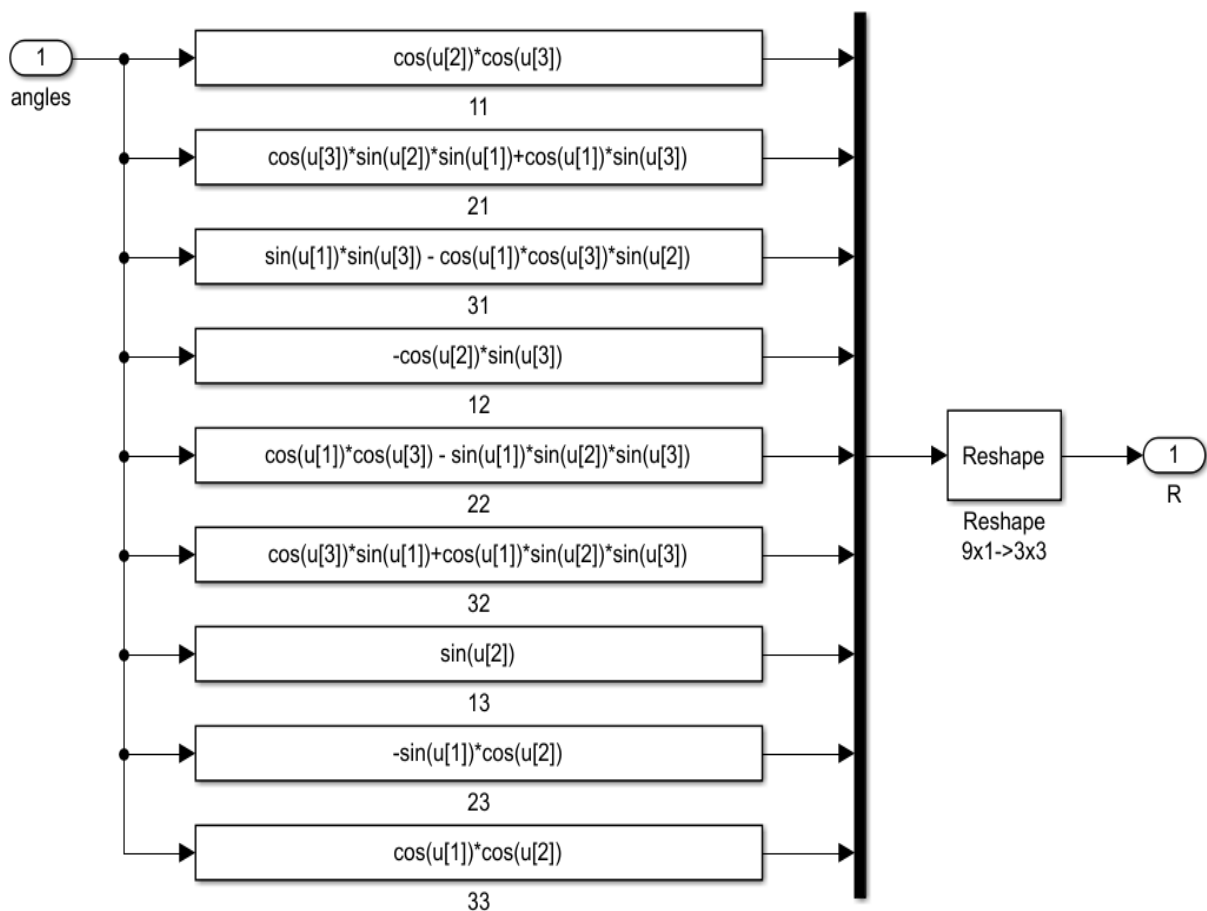


Рис. 2. Структура блока Euler XYZ для преобразования углов Эйлера в соответствующую матрицу поворота

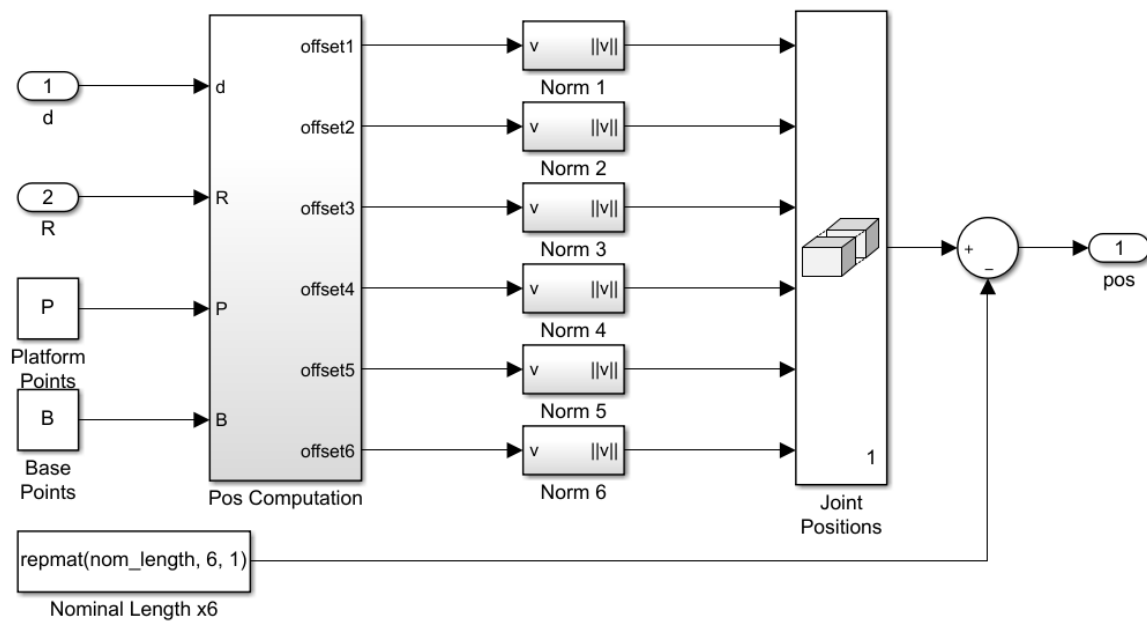


Рис. 3. Структура блока Inverse Kinematics Module для решения обратной задачи кинематики

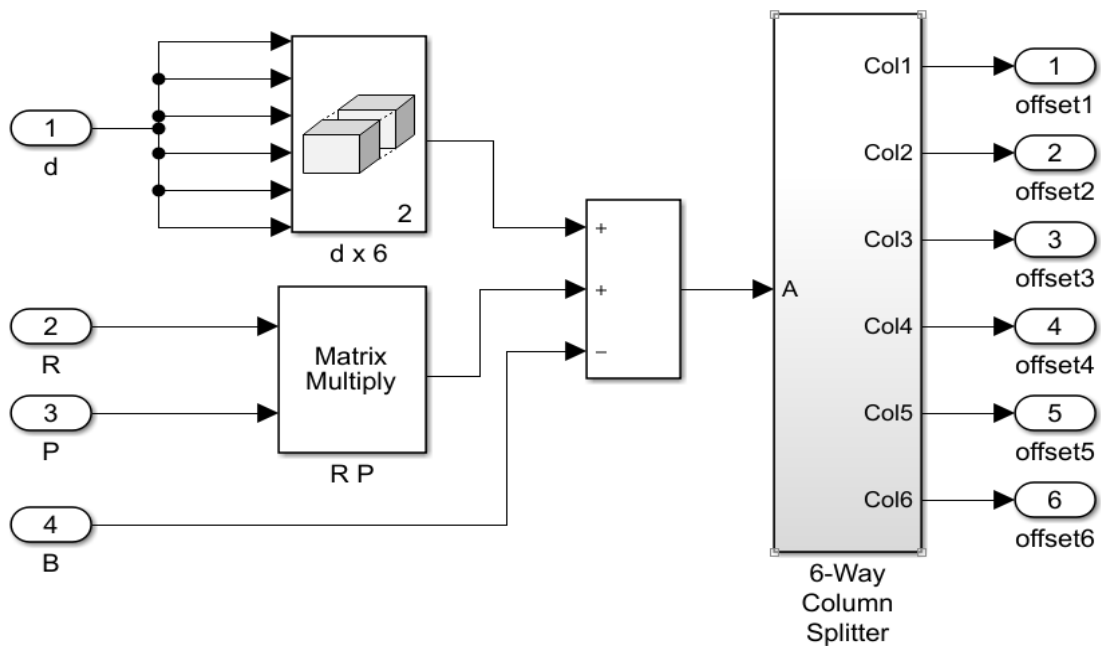


Рис. 4. Блок Pos Computation, входящий в состав блока Inverse Kinematics Module

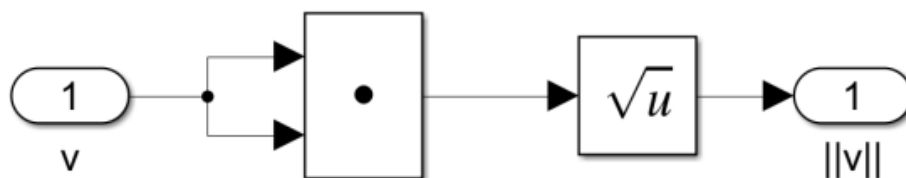


Рис. 5. Блок Norm n, входящий в состав блока Inverse Kinematics Module

При реализации моделирования использованы две системы координат: глобальная декартова система координат с началом в геометрическом центре основания и локальная относительная декартова система координат с началом в геометрическом центре рабочего органа (подвижной

платформы). Входные параметры системы заданы вектором координат точек обрабатываемой траектории как приращения (изменения) относительно нулевого (исходного положения), то есть используют локальную относительную систему координат. Координаты шарниров основания и

координаты начальных положений шарниров подвижной платформы заданы в глобальной системе координат. В исходном положении направления осей глобальной и локальной системы координат совпадают. При движении рабочего органа по заданной траектории локальная система

$$R_j = \begin{bmatrix} \cos \beta_j \cos \gamma_j & -\cos \beta_j \sin \gamma_j & \sin \beta_j \\ \cos \gamma_j \sin \beta_j \sin \alpha_j + \cos \alpha_j \sin \gamma_j & \cos \alpha_j \cos \gamma_j - \sin \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j & -\sin \alpha_j \cos \beta_j \\ \sin \alpha_j \sin \gamma_j - \cos \alpha_j \cos \gamma_j \sin \beta_j & \cos \gamma_j \sin \alpha_j + \cos \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j & \cos \alpha_j \cos \beta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где α, β, γ – углы Эйлера, соответственно углы между осями абсцисс, ординат и аппликата двух принятых систем координат; j – количество точек исследуемой траектории движения рабочего органа.

На схеме (рис. 2) углы Эйлера обозначены: $\alpha = u[1], \beta = u[2], \gamma = u[3]$. Для каждой точки исследуемой траектории задаются углы Эйлера и пересчитывается матрица поворота.

На схеме (рис. 3) используются следующие обозначения математических элементов:

– декартовы координаты траектории движения рабочего органа, заданные в локальной системе вектором

$$d_j = [d_{xj} \ d_{yj} \ d_{zj}], \quad (2)$$

где j – количество точек исследуемой траектории движения рабочего органа;

– исходные координаты шарниров, закрепленных на подвижной платформе, заданы матрицей

$$P = \begin{bmatrix} P_{1x} & P_{2x} & P_{3x} & P_{4x} & P_{5x} & P_{6x} \\ P_{1y} & P_{2y} & P_{3y} & P_{4y} & P_{5y} & P_{6y} \\ P_{1z} & P_{2z} & P_{3z} & P_{4z} & P_{5z} & P_{6z} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где P_{ix}, P_{iy}, P_{iz} – декартовы координаты i -го шарнира в глобальной системе координат;

– координаты шарниров, закрепленных на основании, заданы матрицей

$$B = \begin{bmatrix} B_{1x} & B_{2x} & B_{3x} & B_{4x} & B_{5x} & B_{6x} \\ B_{1y} & B_{2y} & B_{3y} & B_{4y} & B_{5y} & B_{6y} \\ B_{1z} & B_{2z} & B_{3z} & B_{4z} & B_{5z} & B_{6z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где B_{ix}, B_{iy}, B_{iz} – декартовы координаты i -го шарнира в глобальной системе координат;

– координаты шарниров, закрепленных на подвижной платформе, при отработке заданной траектории рабочего органа заданы матрицей

$$A_j = \begin{bmatrix} A_{1xj} & A_{2xj} & A_{3xj} & A_{4xj} & A_{5xj} & A_{6xj} \\ A_{1yj} & A_{2yj} & A_{3yj} & A_{4yj} & A_{5yj} & A_{6yj} \\ A_{1zj} & A_{2zj} & A_{3zj} & A_{4zj} & A_{5zj} & A_{6zj} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

координат может разворачиваться под определенными углами по отношению к глобальной системе координат. Для учета этого обстоятельства применяется обобщенная матрица поворота (преобразования):

где $A_{ixj}, A_{iyj}, A_{izj}$ – декартовы координаты i -го шарнира для j -ой точки исследуемой траектории движения рабочего органа.

В блоке Inverse Kinematics Module (рис. 3, 4) при решении обратной задачи кинематики для определения необходимых величин выдвигания штоков, соответствующих заданной координате рабочего органа при движении по требуемой траектории, сначала определяются требуемые координаты шарниров подвижной платформы:

$$A_j = D_j + R_j \cdot P - B, \quad (6)$$

где матрица D_j получена конкатенацией вектора d_j для приведения к размерности $[3 \times 6]$.

В блоке 6-Way Column Splitter (рис. 4) матрица A_j подвергается обратной конкатенации для получения шести векторов размерностью $[1 \times 3]$, содержащих декартовы координаты положений шарниров. Для каждого вектора выполняется операция скалярного произведения (рис. 5)

$$\|v_i\| = \sqrt{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_i}. \quad (7)$$

Полученные значения $\|v_i\|$ конкатенацией записываются в матрицу JP (Joint Position) размерностью $[1 \times 6]$ (рис. 3). С помощью встроенной функции `Repmat` создается матрица NL (Nominal Length) размерностью $[1 \times 6]$: функция `repmat(A, n)` возвращает массив, содержащий n копий A в размерностях строки и столбца, при этом используется задаваемое значение первоначальной высоты платформы. На окончательном шаге получаем матрицу длин выдвигания штоков NP (New Position) путем вычитания NL из JP:

$$NP = NL - JP. \quad (8)$$

Блок Adams_sub включает блок MSC Software, в настройках которого возможно изменять вид симуляции: с обычного расчетного на интерактивный (рис. 6, 7). В этом случае при запуске симуляции открывается окно Adams и в режиме времени симуляции визуализируется движение системы.

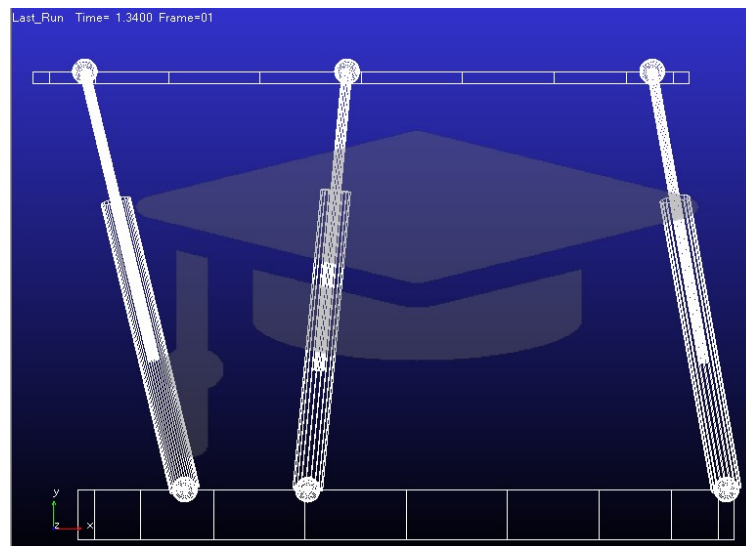


Рис. 6. Скриншот при интерактивной симуляции

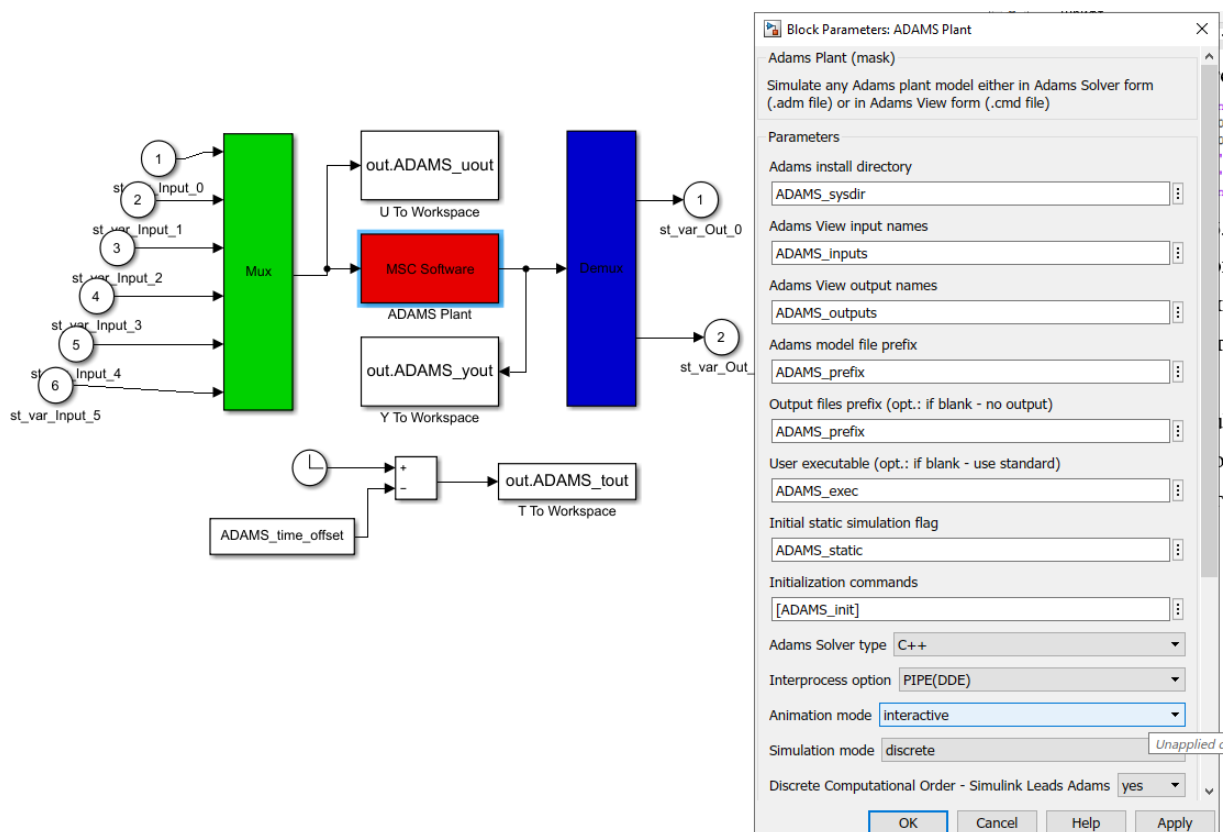


Рис. 7. Окно настроек блока MSC Software

Матрицы P и B , содержащие координаты шарниров, закрепленных на подвижной платформе и основании, а также переменные, связанные с конструктивными особенностями электроцилиндров и используемые в блоке Saturation, рассчитываются в специальной процедуре, написанной на Python, и записываются в Matlab через командную строку. В разработанной авторами процедуре WriteTxtForMatlab выполняется расчет переменных и запись в текстовый файл кода с синтаксисом Matlab, далее текст файла помеща-

ется в командную строку Matlab, после чего происходит добавление необходимых для совместного моделирования матриц и переменных.

Результаты. В соответствии с представленной выше методикой для проверки правильности интеграции и взаимодействия программных пакетов Adams View и Matlab Simulink были проведены серии вычислительных экспериментов по отработке нескольких характерных типов траектории рабочего органа. Условия выполнения экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Условия проведения серий вычислительных экспериментов

№ серии вычислительного эксперимента	Тип заданной тестируемой траектории, функция движения от времени	Количество точек траектории	Время симуляции, сек	Шаг по времени, сек
1	$y = 0.25 * \sin(i)$	1000	10	0,01
2	$x = -0.25 * \sin(i),$ $y = 0.25 * \sin(i)$	1000	10	0,01
3	$x = 0.25 * \sin(i),$ $y = 0.25 * \sin(i)$	1000	10	0,01
4	$\alpha = 0.4\sin(i)$	1000	10	0,01
5	$\beta = 0.4\sin(i)$	1000	10	0,01
6	$\gamma = 0.4\sin(i)$	1000	10	0,01

Для всех серий вычислительных экспериментов в качестве функции, характеризующей траекторию движения во времени, была принята периодическая функция синуса. Для разных серий варьировалась форма движения относительно координатных осей. Первые три серии характеризуют движения по координатным осям с нулевыми углами Эйлера (поворота), то есть на всей траектории движения подвижная платформа горизонтальна и параллельна основанию. В первой серии выбрана самая простая траектория: вертикальное перемещение (рис. 8). Вторая и третья серии – одновременное движение по двум осям: вверх и влево (вправо), вниз и вправо (влево) (рис. 9, 10).

На рисунках 8-10 представлены графики от-

работки траектории (красным – исходная заданная, синим – полученная в результате симуляции) и крайние положения манипулятора при движении по траектории. Началом траектории во всех случаях является середина графика. Как видно из графиков, простая траектория отрабатывается с высокой точностью, практически с нулевыми отклонениями (рис. 8, табл. 2). Траектории второй и третьей серий оказались весьма проблематичны при обработке. В связи с конструктивными особенностями и поставленным ограничением на отсутствие возможности поворота подвижная платформа конструктивно не может выполнить данный тип траекторий, об этом свидетельствуют существенные отклонения от заданной траектории, в особенности в крайних положениях (рис. 9, 10, табл. 2).

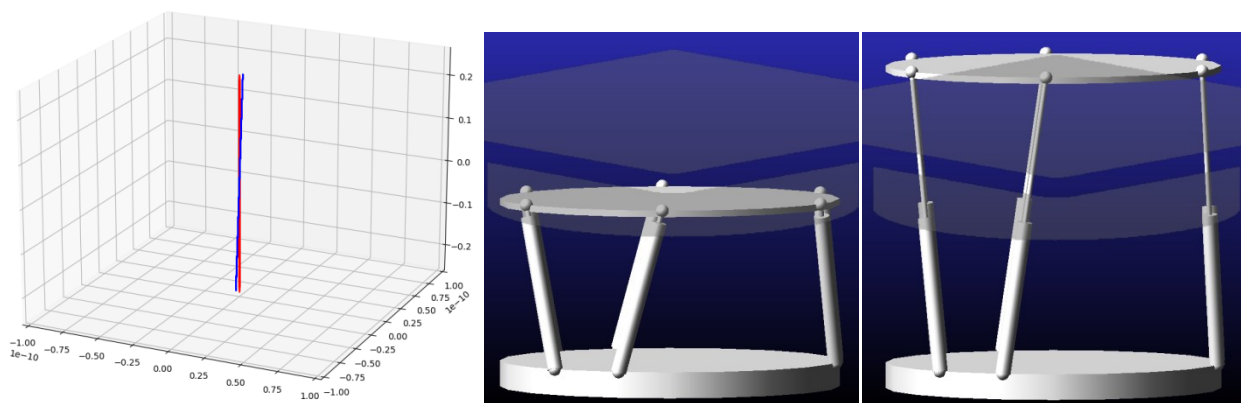


Рис. 8. Результаты симуляции и отработки траектории вычислительного эксперимента серии №1

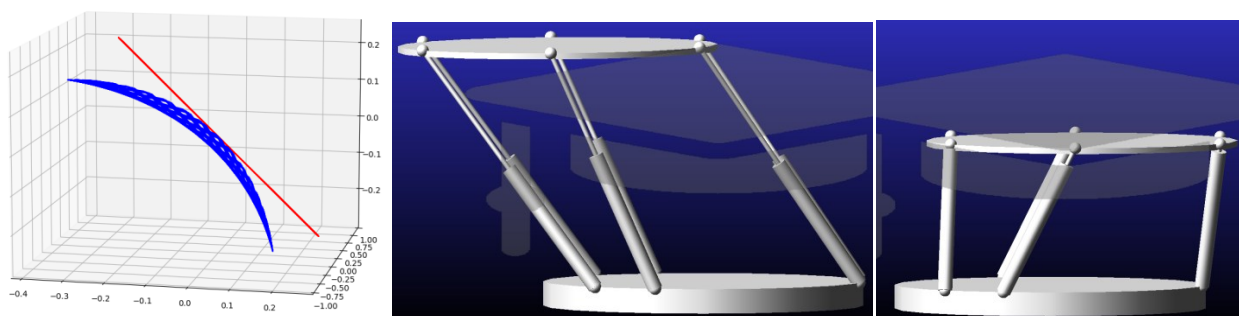


Рис. 9. Результаты симуляции и отработки траектории вычислительного эксперимента серии №2

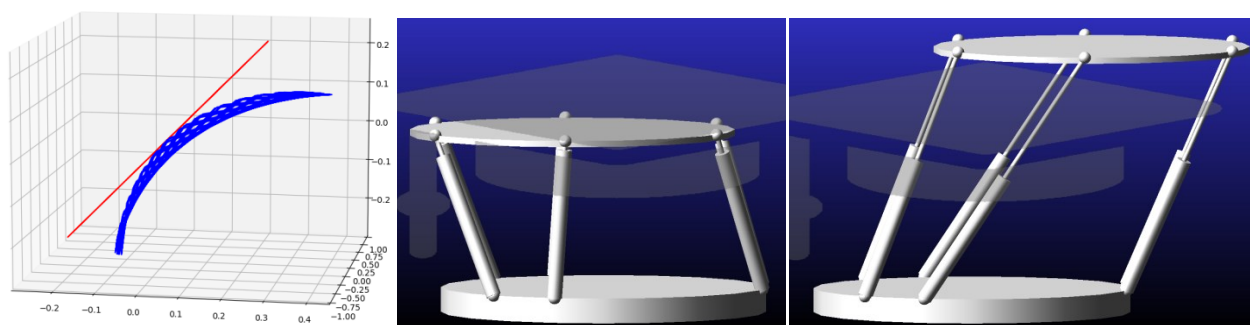


Рис. 10. Результаты симуляции и обработки траектории вычислительного эксперимента серии №3

Вычислительные серии № 4, 5 и 6 поочередно задействуют один из углов Эйлера (поворота) и характеризуют три возможных поворота подвижной платформы относительно основания, при этом движение центра платформы (рабочего органа) по координатным осям отсутствует. На рисунках 11-13 представлены крайние положения манипулятора при осуществлении указанных поворотов, а в таблице 3 – результаты проверки

точности движения. Данные повороты платформы не представляют сложности обработки и имеют высокую точность. Все траектории движения обрабатывались по множеству циклов движения. Точность воспроизведения заданных траекторий оценивалась по двум критериям: среднеарифметическому и среднеквадратичному отклонению (табл. 2, 3).

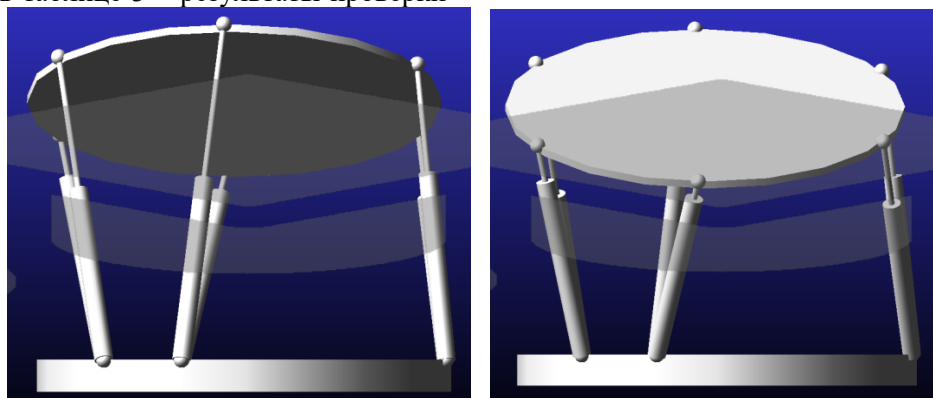


Рис. 11. Крайние положения при обработке траектории вычислительного эксперимента серии №4

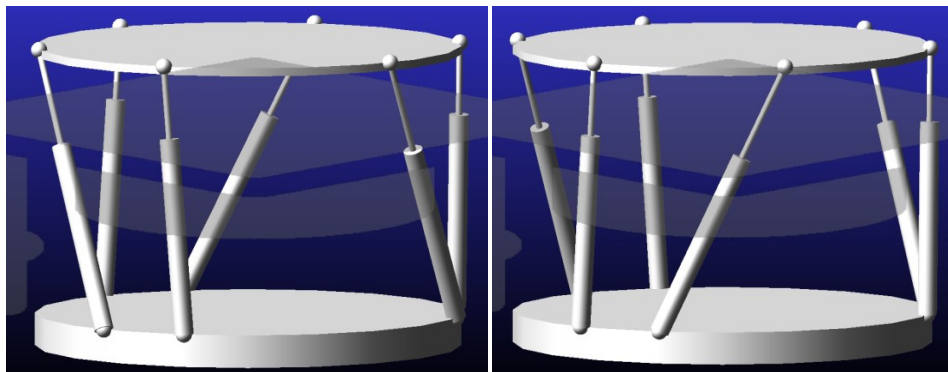


Рис. 12. Крайние положения при обработке траектории вычислительного эксперимента серии №5

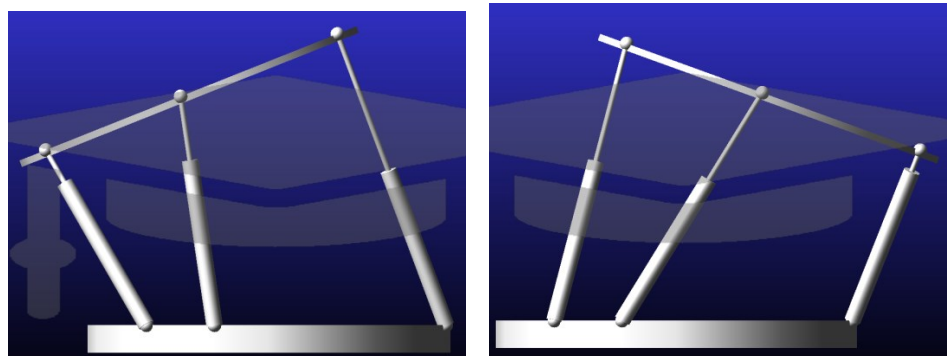


Рис. 12. Крайние положения при обработке траектории вычислительного эксперимента серии №6

Таблица 2

Результаты проведения серий вычислительных экспериментов (№ 1, 2, 3)

№ серии вычислительного эксперимента	Отклонение от заданной траектории					
	x	y	z	α	β	γ
среднеарифметическое отклонение						
1	$1.5 \cdot 10^{-12}$	0.0013	$7.4 \cdot 10^{-15}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$2.3 \cdot 10^{-13}$	$5.9 \cdot 10^{-13}$
2	0.3176	0.2996	$1.3 \cdot 10^{-14}$	0.0391	$3.2 \cdot 10^{-13}$	$7.9 \cdot 10^{-13}$
3	0.2148	0.2134	$1.3 \cdot 10^{-14}$	0.0391	$3.2 \cdot 10^{-13}$	$7.9 \cdot 10^{-13}$
среднеквадратичное отклонение						
1	$7.8 \cdot 10^{-13}$	0.0009	$1.1 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{-13}$	$3.1 \cdot 10^{-13}$	$8.4 \cdot 10^{-13}$
2	0.1777	0.1541	$1.1 \cdot 10^{-14}$	0.0354	$2.6 \cdot 10^{-13}$	$7.6 \cdot 10^{-13}$
3	0.1586	0.1514	$1.1 \cdot 10^{-14}$	0.0354	$2.6 \cdot 10^{-13}$	$7.6 \cdot 10^{-13}$

Таблица 3

Результаты проведения серий вычислительных экспериментов (№ 4, 5)

№ серии вычислительного эксперимента	Отклонение от заданной траектории		
	α	β	γ
среднеарифметическое отклонение			
4	0.0629	0.0629	0.0629
5	0.3138	0.2514	0.2514
среднеквадратичное отклонение			
4	0.0317	0.0317	0.0317
5	0.3332	0.1266	0.1266

Выводы. Представленная методика совместного моделирования движения параллельного манипулятора посредством интегрированного применения Matlab Simulink и Adams View с целью отработки заданной траектории движения рабочего органа показывает хорошие результаты и может использоваться при выполнении кинематического, динамического и силового анализа механизма с учетом его конструктивных особенностей посредством использования виртуального прототипа. Методика позволяет определять конструктивную возможность отработки заданной траектории, оценить ее точность, выявить проблемные зоны и недостижимые координатные положения. Представленный подход применим в рамках разработки, модернизации, оптимизации конструктивных элементов манипуляторов параллельной структуры, определения рабочей зоны, а также разработки систем управления движением.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе

Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алюшин Ю.А., Еленев С.А., Шептунов С.А. Математическая модель движения платформы Стюарта // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 57–67.
2. Леонов Г.А., Зегжда С.А., Зуев С.М. Динамика платформы Стюарта и управление ее движением // Доклады академии наук. 2014. Т. 458. № 1. С. 36–41. DOI: 10.7868/S0869565214250094
3. Воробьев А.Н., Гебель Е.С. Прямая и обратная позиционная задача платформы Гью-Стюарта с шестью степенями свободы // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2(5). С. 69–73.
4. Кешткар С., Позняк А.С., Хернандес Э., Оропеса А. Адаптивный регулятор на скользящих режимах, основанный на «супер-твист» наблюдателе состояний с применением к регулированию платформы Стюарта // Автоматика и телемеханика. 2017. №7. С. 57–75.

5. Гапоненко Е.В., Чичварин А.В., Рыбак Л.А. Синтез многосвязного цифрового регулятора роботизированной виброзащитной платформой на основе Н-оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2018. № 7. С. 99–116. DOI: 10.31857/S000523100000269-9
6. Лапиков А.Л., Пашенко В.Н. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью-Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 124–134. DOI: 10.7463/0414.0706936.
7. Туктыбаева А.Е. Силовой анализ платформы Стюарта // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 4-4(24). С. 82–88.
8. Войнов И.В., Телегин А.И., Тимофеев Д.Н. Векторный и скалярный виды уравнений для решения задач динамики платформы Стюарта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16. № 4. С. 19–28. DOI: 10.14529/ctcr160403.
9. Боюнова Е.М., Палочкин С.В. Моделирование структуры механизма на базе платформы Стюарта в среде Mathcad // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2016. № 6-1. С. 70–73.
10. Волкоморов С. В., Карпенко А. П., Лелетко А. М. Оптимизация угловых и линейных размеров одно- и двухсекционного манипуляторов параллельной кинематики // Наука и образование. 2010. № 8. С. 1–22.
11. Грешняков П.И. Совершенствование пневматической системы управления платформы Стюарта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 1. С. 151–162.
12. Сейдахмет А.Ж., Абдураимов А.Е., Камал А.Н. Использование обратной кинематики и системы Matlab для управления рычажной платформой Стюарта // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8. С. 216–220.
13. Танырбергенова К.И., Миргаликызы Т. Решение прямой и обратной задач управления кинематикой робота на примере платформы Стюарта // Вестник казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2020. № 3(114). С. 334–341.
14. Ермилов Г.С. Разработка систем управления тренажера на основе платформы Стюарта // Colloquium-Journal. 2020. № 12-1 (64). С. 11–21.
15. Лопатин А.А. Разбор механизмов с шестью степенями свободы и практического применения на примере платформы Гью-Стюарта // Современные проблемы теории машин. 2020. № 9. С. 33–36.
16. Кольцов А.Г., Блохин Д.А., Хабаров А.В. Влияние кинематических характеристик платформы Стюарта на точность перемещения измерительного механизма // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 2. С. 296–299.
17. Сопин П.К., Гайнуллина Я.Н. Разработка конструкции стенда-симулятора на основе платформы Стюарта-Гауфа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 5(313). С. 142–145.

Информация об авторах

Дуюн Иван Александрович, студент кафедры технической кибернетики. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой высшей математики. E-mail: belgoras@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.07.2022 г.

© Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А., 2022

*Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

*E-mail: duyun77@mail.ru

CO-SIMULATION PARALLEL MANIPULATOR MOVEMENTS USING ADAMS-MATLAB

Abstract. The article presents the methods and results of the analysis of the movement of a modeling manipulator such as the Hugh-Stewart platform using Adams-Matlab in order to check and develop a possible trajectory of the working body. Application of Matlab Simulink for solving kinematics problems: determining the extension length of rods along a given trajectory of the movement of the working body. A feature of the Simulink application scheme is the export of physical and mechanical parameters of a solid model from Adams. Mutual integration of Matlab Simulink and Adams View evaluate the implementation of the possibility of implementing a kinematic, comprehensive and force analysis of the mechanism, taking into account its design features due to the use of an apparent prototype. The proposed method of joint modeling is presented in the form of a detailed description of the content of Simulink circuit blocks, their interaction in modeling, the exact mathematical apparatus and the conditions for implementing mutual thoroughness of the Matlab and Adams software packages. The technique was tested on the ascent from constructive platforms while moving along a sexual character such as a given trajectory. The results of a computational experiment are proposed and an analysis is made of the coordinate correspondence of the actual trajectory obtained as a result of modeling in joint simulation with the initial given trajectory for various types of motion.

Keywords: parallel structure manipulators, virtual prototype, co-simulation, motion trajectory, Hugh-Stewart platform.

REFERENCES

1. Alyushin Yu.A., Elenev S.A., Sheptunov S.A. Mathematical model of Stewart platform motion [Matematicheskaya model' dvizheniya platformy Styuarta]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2010. No. 4. Pp. 57–67. (rus)
2. Leonov G.A., Zegzhda S.A., Zuev S.M. Dynamics and control of the Stewart platform [Dinamika platformy Styuarta i upravlenie ee dvizheniem]. Doklady Physics. 2014. Vol. 458. No. 1. Pp. 36–41. DOI: 10.7868/S0869565214250094. (rus)
3. Vorob'ev A.N., Gebel' E.S. Direct and inverse positional problem of the Hugh-Stewart platform with six degrees of freedom [Pryamaya i obratnaya pozicionnaya zadacha platformy G'yu-Styuarta s shest'yu stepenyami svobody]. Modern materials, equipment and technologies. 2016. No 2(5). Pp. 69–73. (rus)
4. Keshtkar S., Poznyak A.S., Hernandez E., Oropeza A. Adaptive sliding-mode controller based on the "super-twist" state observer for control of the Stewart platform [Adaktivnyj regulyator na skol'zyashchih rezhimah, osnovannyj na «super-twist» nablyudatele sostoyanij s primeneniem k regulirovaniyu platformy Styuarta]. Automation and Remote Control. 2017. No. 7. Pp. 57–74. (rus)
5. Gaponenko E.V., Chichvarin A.V., Rybak L.A. Synthesis of a multi-connected digital controller for a robotized vibration isolation platform based on H-optimization [Sintez mnogosvyaznogo cifrovogo regulatora robotizirovannoj vibrozashchitnoj platformoj na osnove N-optimizacii]. Automation and telemechanics. 2018. No. 7. Pp. 99–116. DOI: 10.31857/S000523100000269-9. (rus)
6. Lapikov A.L., Pashchenko V.N. Solution of the direct problem of kinematics for the platform Hugh-Stewart using the analytical equation of the plane [Reshenie pryamoj zadachi kinematiki dlya platformy G'yu-Styuarta s ispol'zovaniem analiticheskogo uravneniya ploskosti]. Science and education: scientific edition of MSTU im. N.E. Bauman. 2014. No. 4. Pp. 124–134. DOI: 10.7463/0414.0706936. (rus)
7. Tuktybaeva A.E. Force analysis of the Stewart platform [Silovoj analiz platformy Styuarta]. Actual scientific research in the modern world. 2017. No. 4-4(24). Pp. 82–88. (rus)
8. Voynov I.V., Telegin A.I., Timofeev D.N. Vector and scalar equations types to solve problems of the dynamics of the Stewart platform [Vektornyj i skalyarnyj vidy uravnenij dlya resheniya zadach dinamiki platformy Styuarta]. Bulletin of the South Ural State University. Series: computer technology, control, radio electronics. 2016. Vol. 16. No. 4. Pp. 19–28. DOI: 10.14529/ctcr160403. (rus)
9. Boyunova E.M., Palochkin S.V. Modeling the mechanism structure based on the Stewart platform in the Mathcad environment [Modelirovanie struktury mekhanizma na baze platformy Styuarta v srede Mathcad]. News of the Oryol State Technical University. Series: Information systems and technologies. 2016. No. 6-1. Pp. 70–73. (rus)
10. Volkomorov S.V., Karpenko A.P., Leletko A.M. Optimization of angular and linear dimensions

of one- and two-section manipulators of parallel kinematics [Optimizatsiya uglovyh i linejnyh razmerov odno- i dvuhsekcionnogo manipulyatorov parallel'noj kinematiki]. Science and education. 2010. No 8. Pp. 1–22. (rus)

11. Greshnyakov P.I. Stewart platform pneumatic control system development and characteristic research [Sovershenstvovanie pnevmaticheskoy sistemy upravleniya platformy Styuarta]. Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2016. Vol. 15. No. 1. Pp. 151–162. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-151-162. (rus)

12. Seydakhmet A.Z., Abduraimov A.E., Kamal A.N. Using the inverse kinematics and the matlab system for controlling the Stewart platform [Ispol'zovanie obratnoj kinematiki i sistemy Matlab dlya upravleniya rykhazhnoj platformoj Styuarta]. International journal of applied and fundamental research. 2017. No. 8. Pp. 216–220. (rus)

13. Tanyrbegenova K.I., Mirgalikzy T. Solution of direct and inverse problems of robot kinematics control on the example of Stuart's platform [Reshenie pryamoj i obratnoj zadach upravleniya kinematikoj robota na primere platformy Styuarta]. Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaeva. 2020. No. 3(114). Pp. 334–341. DOI: 10.52167/1609-1817-2020-114-3-334-341. (rus)

14. Ermilov G.S. Development of simulator management systems based on the Stewart platform [Razrabotka sistem upravleniya trenazhera na osnove platformy Styuarta]. Colloquium-Journal. 2020. No. 12-1 (64). Pp. 11–21. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11786. (rus)

15. Lopatin A.A. Parsing of mechanisms with six degrees of freedom and practical application on the example of the Gew-Stewart platform [Razbor mekhanizmov s shest'yu stepenyami svobody i prakticheskogo primeneniya na primere platformy G'yu-Styuarta]. Modern problems of machine theory. 2020. No 9. Pp. 33–36. DOI: 10.26160/2307-342X-2020-9-33-36. (rus)

16. Kolcov A.G., Blohin D.A., Habarov A.V. Influence of the kinematic characteristics of the Stuart platform on the accuracy of movement of the measuring mechanism [Vliyanie kinematicheskikh harakteristik platformy Styuarta na tochnost' peremeshcheniya izmeritel'nogo mekhanizma]. Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2014. No. 2. Pp. 296–299. (rus)

17. Sopin P.K., Gaynullina Ya.N. Design booth-simulation based on the Stewart-Gough platform [Razrabotka konstrukcii stenda-simulyatora na osnove platformy Styuarta-Gaufa]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015. No. 5(313). Pp. 142–145. (rus)

Information about the authors

Duyun, Ivan A. Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gorlov, Alexander S. Candidate of Engineering Sciences. E-mail: belgoras@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.07.2022

Для цитирования:

Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А. Совместное моделирование движения параллельного манипулятора с использованием Adams-Matlab // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119

For citation:

Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A. Co-simulation parallel manipulator movements using Adams-Matlab. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-120-127

^{1,*}Сахнов А.В., ²Фоменко Ю.В.¹Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина²Белгородский государственный технологический университет им. Шухова

*E-mail: sakhnovav@mail.ru

СПОСОБ РЕМОНТА ГАЙКИ ХОДОВОГО ВИНТА

Аннотация. Тиски – это устройство, предназначенное для фиксации заготовок при обработке. Широко применяют тиски при обработке материалов из металла, дерева, пластика и других материалов при единичном или мелкосерийном производстве. Основными деталями тисков являются две губки, у одной из которых есть возможность перемещаться относительно другой. Возможность перемещения обеспечивают ходовым винтом, который вращается в гайке ходового винта, жестко закрепленной в неподвижной губке при помощи штифта. Частой причиной отказа тисков является проворачивание винта в гайке, вследствие чего исключается возможность фиксации заготовок. При этом приходит в негодность резьба гайки тисков, в то время как винт практически не изнашивается. Объясняется это тем, что винт и гайка выполнены из различных материалов, при чем винт выполнен более износостойким. Для восстановления гайки из нее вырезают, например, с помощью угловой шлифовальной машины, ее резьбовую часть, по направлению А-А. Толщина отрезного круга угловой шлифовальной машинки (толщина реза) должна быть не меньше шага резьбы. Разрезанные части гайки после соединения их на винте необходимо «прихватить» при помощи сварки. После «прихватывания» разрезанных частей гайки посредством сварки необходимо вывернуть винт и хорошо заварить сопряженные элементы. При сварке необходимо следить за тем, чтобы сварочная ванна не повредила резьбу. Предложенный способ ремонта тисков позволит восстановить их работоспособное состояние, при этом можно будет сэкономить на приобретении новой дорогостоящей гайки.

Ключевые слова: тиски, ходовой винт, гайка ходового винта.

Введение. Тиски – это устройство, предназначенное для фиксации заготовок при машинной или ручной обработке. Широко применяют тиски при обработке материалов из металла, дерева, пластика и других материалов при единичном или мелкосерийном производстве [1–3].

В конструкции тисков есть ходовой винт, на котором выполнена трапециевидная резьба по ГОСТ 9484 или упорная резьба по ГОСТ 10177.

Нарезание резьбы под ходовой винт для тисков с шириной губок более 63 мм непосредственно в корпусных деталях не допускается.

Чаще всего тиски выпускают в соответствии с ГОСТ 4045-75 Тиски слесарные с ручным приводом для продажи через розничную торговую сеть.

Материалы и методы. Рабочими частями тисков являются губки со сменными плоскими

планками чаще всего имеют насечку. Насечку выполняют перекрестной, при этом шаг ее составляет 2–3 мм, а глубина – 0,5–1 мм.

По желанию заказчика тиски могут дополнительно комплектоваться:

а) планками сменными из мягкого материала, например, из стали без термообработки, латуни, дюрали, текстолита или других материалов;

б) планками специальными сменными, предназначенными для фиксации фасонных, цилиндрических или других деталей с требуемыми видами и размерами насечек или вообще без насечек [4].

При этом материал и твердость составных частей тисков должны соответствовать требованиям, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Материалы и характеристики деталей тисков ГОСТ 4045-75

Наименование элементов тисков	Исполнение	Марка материала	Номер стандарта	Твердость HRC
Корпусные детали	А	Сталь 45	ГОСТ 1050	–
		Сталь 45Л	ГОСТ 977	
	Б	Чугун СЧ 20, СЧ 25, СЧ 30	ГОСТ 26358	
Винт ходовой	Сталь 45		ГОСТ 1050	36,5...41,5
Рукоятка				
Гайка ходового винта	Бронза БР. ОЦС.-5-5-5		ГОСТ 613	–
Планки сменные	Сталь У7, У7А, У8, У8А		ГОСТ 1435	45...53

Анализ таблицы 1 показал, что требований к твердости гайки ходового винта нет, как следствие для удешевления стоимости тисков производители изготавливают гайку из более мягких и менее дорогостоящих материалов.

При изготовлении, эксплуатации и после ремонта тисков подвижные их части должны перемещаться без рывков и заеданий. Кроме того, тиски должны обеспечивать надежную фиксацию заготовки в требуемом положении [5].

На поверхности гаек тисков встречаются трещины, которые представляют собой дефекты в виде разрушений, возникающих на границах и внутри кристаллов, а также в месте расположения неметаллических включений в результате перенапряжения металла при его обработке. Для определения трещин гайки подвергают нагреву. При этом поверхность трещины покрывается окалиной [6–9].

Трещины подразделяют на следующие виды:

- трещины напряжения;
- штамповочные трещины;
- трещины сдвига;
- трещины от неметаллических включений;
- трещины от раскатанных пузырей;
- трещины от рисок.

Трещины напряжения возникают во время термической обработки гаек. Напряжения бывают термические и деформационные. Трещины напряжения обычно появляются произвольно на поверхности.

Штамповочные трещины возникают при отрезке и деформации заготовки, при прошивке отверстия и так далее, их выявляют на опорных поверхностях гаек или в местах перехода от опорной поверхности гайки к фаске или резьбе.

В процессе дефектации допускается присутствие штамповочных трещин на торцевых и на опорных поверхностях, на поверхности стопорного элемента, при этом допускается на каждой опорной поверхности не более двух трещин. В случае если трещина переходит в резьбу гайки, то допускается ее распространение не более чем на один виток резьбы. При этом глубина трещины не должна быть более половины шага резьбы, при этом ширина ее – более 0,3 мм.

Допускаются трещины на внутренних фасках отверстия гайки не переходящие на резьбу.

Трещины сдвига могут появиться в результате деформации металла на поверхностях под ключ, на фасках и на боковой поверхности фланца или бурта. Трещины сдвига могут быть расположены под углом 45° к оси гайки.

Трещины от рисок на теле гайки могут возникать из-за деформации заготовок на поверхностях под гаечный ключ, на бурте и фланце [2–4].

Трещины от раскатанных пузырей в материале гайки чаще всего бывают прямые и могут располагаться как на боковых поверхностях, так и на бурте и фланце.

Кроме трещин к дефектам гаек относят рванины, которые представлены в виде открытых разрывов в металле и возникают в местах, больше всего подвергающихся деформации.

Кроме того, на гайках возникают складки, которые появляются при запрессовке заусенцев, образующихся в процессе штамповки гаек, и располагаются они чаще всего на опорной поверхности в местах перехода от опорной поверхности к резьбе, а также на боковой поверхности гайки.

Рябизна на гайках может быть представлена в виде неглубоких выемок на их поверхностях, которые во время штамповки не заполняются металлом и возникают вследствие вдавливания стружки. Еще одной причиной появления рябизны является образование коррозии на исходном материале заготовки.

Еще одним дефектом при производстве гаек являются следы от металлообрабатывающего инструмента и представляют собой как продольные, так и кольцевые риски небольшой глубины, возникающие вследствие движения режущего инструмента по поверхности гайки.

Кроме того, на гайках иногда появляются повреждения резьбы – это рванины или выкрашивания по профилю резьбы, образующиеся при операциях накатки или нарезки резьбы.

Кроме того, к дефекту поверхности резьбы относят заусенцы, представляющие собой острые, в виде гребня, выступы, образовавшиеся при изготовлении на металлообрабатывающих станках.

К методам контроля дефектов относят визуальный или металлографический контроль [4].

Для проведения испытания по месту расположения дефекта готовят шлиф. Если дефекты в виде трещин, рванин или рябизны располагаются на поверхностях под ключ или на резьбовой поверхности, то для определения глубины трещины шлиф готовят перпендикулярно к оси гайки.

В случае если рябизна или трещина расположены на опорной поверхности, то для определения ее глубины шлиф готовят параллельно оси гайки.

При контроле дефектов поверхности гаек допускается применять магнитные методы, например, метод магнитной дефектоскопии.

Во время эксплуатации в зависимости от ширины губок тиски должны обеспечивать силу

прижатия заготовки и выдерживание крутящего момента согласно данным, указанным в табл. 2. Надежность тисков определяют 95 %-ым ресурсом,

равным тысяче нагружений крутящим моментом, составляющим 80 % от испытательного крутящего момента (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость крутящего момента на рукоятке тисков от ширины губок

Ширина губок тисков, мм	Сила зажима изделия, Н (кгс)	Крутящий момент, Н·м (кгс·м)
63	9807 (1000)	73,5 (7,5)
80	14709 (1500)	147,0 (15,0)
100	19612 (2000)	196,0 (20,0)
125	24515 (2500)	284,5 (29,0)
140	29418 (3000)	364,0 (37,0)
160	34321 (3500)	470,5 (48,0)
180	41185 (4200)	588,5 (60,0)
200	50991 (5200)	804,0 (82,0)

Испытания тисков на надежность, при котором их закрепляют на стенде, затем рукояткой перемещают подвижную губку на длину хода тисков, помещают между губками (по их оси) металлический образец и прикладывают циклическую нагрузку. При этом результаты испытаний считаются положительными, если каждые тиски, которые проходили испытание, не достигнут предельного состояния после 1000 нагружений.

В настоящее время известны различные способы восстановления резьбовых соединений.

Известен способ восстановления наружной резьбы на валах, при котором сорванную резьбу (менее 3-х ниток) и забоины устраняют прогонкой с помощью резьбонарезного инструмента [10]. Рассмотренный способ применяют для восстановления наружной резьбы.

Кроме того, известен способ восстановления резьбы без изменения первоначального размера, при котором изношенную резьбу удаляют обтачиванием на 1 мм, наплавляют слой металла с припуском 1,5...2 мм на сторону, обтачивают наплавленный участок вала и нарезают резьбу номинального размера [10]. Способ имеет высокую трудоемкость. Кроме того, способ приводит к появлению обширной зоны термического поражения основного материала вала, что во многих случаях недопустимо.

Рассмотренные способы восстановления резьбы применимы только для наружной резьбы.

Известен способ ремонта резьбовых отверстий установкой резьбовых спиральных вставок, которые изготавливают из проволоки ромбического сечения, при этом специальную вставку устанавливают в отверстие специальным монтажным инструментом, изготовленным для каждого размера резьбы [10, рис. 5.1]. Использование данного способа для ремонта резьбовых отверстий приводит к усложнению способа в связи с необходимостью изготовления и установки дополнительной детали.

Известен способ восстановления резьбы, который позволяет заменить поврежденную резьбу в объекте с резьбой, идентичной поврежденной резьбе, путем увеличения исходного резьбового отверстия и установки резьбовой вставки в новое резьбовое отверстие в объекте, которое имеет внутреннее резьбовое отверстие, идентичное исходному резьбовому отверстию. Когда резьбовая вставка вставляется в увеличенное резьбовое отверстие, создается уплотнение между резьбовой вставкой и объектом [11]. Для реализации рассмотренного способа необходимо сложное дорогостоящее оборудование.

Основная часть. В тисках встречаются резьбовые сопряжения, в которых изнашивается резьба гайки, в то время как наружная резьба винта практически не изнашивается, поскольку его выполняют из более твердого материала (табл. 1).

Задачей предлагаемого способа ремонта гайки ходового винта тисков является восстановление сопряжения в резьбовом соединении за счет удаления части материала гайки [12, 13].

Технический результат достигается удалением части материала гайки с последующим соединением частей детали, например, с помощью сварки.

Примером конкретного выполнения предлагаемого способа ремонта являлись тиски с шириной губок 80 мм.

Основными деталями тисков являются две губки (рис. 1), у одной из которых есть возможность перемещаться относительно другой [2, 3]. Возможность перемещения обеспечивают ходовым винтом, который вращается в гайке ходового винта 3, жестко закрепленной в неподвижной губке 2 при помощи штифта, устанавливаемого в отверстие 4.

Ходовой винт имеет возможность вращения в гайке, соединенной с помощью штифта с корпусом тисков.

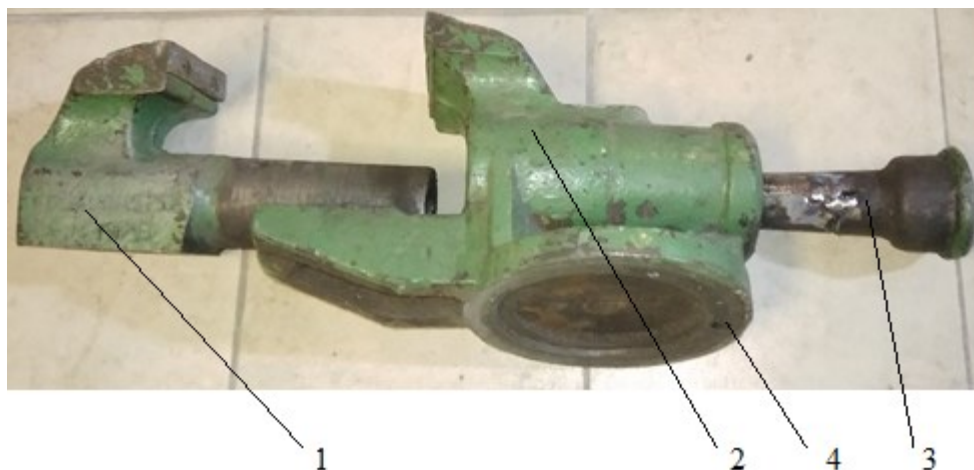


Рис. 1. Основные детали тисков:

1 – подвижная губка; 2 – неподвижная губка; 3 – гайка ходового винта; 4 – отверстие под штифт

Винт расположен в подвижной части, а гайка в неподвижной, за счет чего обеспечивают подвижность губок и возможность фиксации деталей.

Основной причиной поломки рассматриваемых тисков являются приложение чрезмерного усилия при фиксации заготовок. Чрезмерное усилие прикладывают способом удлинения стандартной длины рукоятки, например, с помощью трубы подходящего диаметра. При этом резко увеличивается момент затяжки [4–6], определяемый по формуле:

$$M = F \cdot (L + l),$$

где M – момент прижатия заготовки, Н м; F – сила затяжки, Н; L – длина рукоятки тисков, м; l – удлинитель рукоятки, м.

Еще одной причиной отказа тисков является применение их не по назначению.

К явным отказам можно отнести разлом подвижной губки, разрушение или износ гайки, люфт винта, плохая фиксация заготовок, выкручивание винта при разжатии заготовки, невозможность снятия заготовки.

Некоторые дефекты слесарных тисков можно визуально обнаружить. К таким незначительным дефектам относят коррозию, трещины, сколы, излом или изгиб отдельных деталей [14–15].

Перед ремонтом тиски нужно очистить от загрязнений и ржавчины [7, 8].

Наиболее частой причиной отказа тисков является проворачивание винта в гайке, вследствие чего исключается возможность фиксации заготовок. При этом чаще всего приходит в негодность резьба гайки тисков, в то время как винт практически не изнашивается. Примеры гаек тисков представлены на рисунке 2.



а)



б)



в)

Рис. 2. Примеры гаек ходовых винтов для различных тисков

Научной новизной является способ восстановления гайки ходового винта тисков [9, 10].

Для реализации предлагаемого способа вырезают, например, с помощью угловой шлифовальной машинки, из гайки ее резьбовую часть. Поскольку резьба нарезана не на всю длину гайки, рез выполняли по направлению А-А, как показано на рисунке 3. Толщина реза угловой шлифовальной машинки (толщина шлифовального круга) должна быть не меньше шага резьбы.

После разрезания гайки по направлению А-А соединяют и закрепляют разрезанные ее части, например, в тисках, как показано на рисунке 4 а. Разрезанные части гайки после соединения их на винте необходимо «прихватить» при помощи сварки (рис. 4 б).

После «прихватывания» разрезанных частей гайки посредством сварки необходимо вывернуть винт и хорошо заварить сопряженные элементы. При сварке необходимо следить за тем,

чтобы сварочная ванна не повредила резьбу [11]. В случае повреждения резьбы ее необходимо

восстановить любым известным способом [12–14].

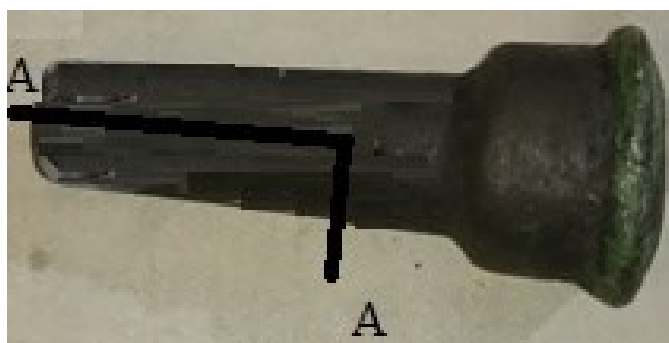


Рис. 3. Гайка тисков с указанием плоскостей реза А-А



а)



б)

Рис. 4. Фиксация разрезанных частей гайки в тисках

Испытания на надежность проводились на отремонтированных тисках с шириной губок 80 мм.

После ремонта гайки и сборки тисков провели их испытания, посредством фиксации в них заготовки.

В соответствии с ГОСТ 4045-75 для ширины губок 80 мм тиски должны выдерживать крутящий момент 147,0 Н·м (табл. 2). При этом нагрузка прикладывалась к рукоятке на расстоянии 30 мм от ее торца.

В соответствии с требованиями безопасности рукоятка тисков и накладные планки не должны иметь забоин и заусенцев. Отверстие головки винта должно иметь с двух сторон округления для предохранения руки рабочего от защемления. Тиски должны иметь устройство, предотвращающее полное вывинчивание ходового винта из гайки.

Плавность хода подвижных частей тисков проверялась путем трехкратного перемещения их вручную на полную величину хода.

Зазор между сменными плоскими планками при закрытых тисках должен проверяться щупом по всему периметру контакта планок.

Измерение допуска параллельности рабочих поверхностей сменных плоских планок при раскрытых тисках производилось при раскрытии на половину длины хода ходового винта.

Между планками подвижной и неподвижной губок на расстоянии не более 5 мм от края планок зажимали стальной образец, выполненный в виде

шара. Образец имел твердость в диапазоне от 49,5...53 HRC.

При зажиме образца крутящий момент на рукоятке тисков прикладывали равным 80 % величины испытательного крутящего момента, указанного в таблице 2.

Прочность гайки тисков испытывалась трехкратным приложением крутящего момента к рукоятке тисков для случаев, когда расстояние между губками равно нулю; расстояние между губками равно 20 мм (ширина фиксируемого образца равна 20 мм) и расстояние между губками равно 70 мм (ширина фиксируемого образца равна 70 мм).

Допуск параллельности определяли как разность наибольшего и наименьшего расстояний между планками.

Относительное смещение верхних и боковых граней сменных планок проверяли при закрытых тисках универсальными измерительными средствами.

Для проверки холостого хода рукоятки ходового винта, в тисках усилием руки, приложенной к рукоятке, должен быть легко зажат стальной образец.

Нагрузка прикладывалась к рукоятке на расстоянии не более 30 мм от ее торца.

Выводы. Тиски, прошедшие испытания не имели остаточных деформаций и разрушения деталей. На восстановленной гайке тисков после испытаний не выявлено остаточных деформаций, выкрашиваний, трещин и прочих дефектов.

Предложенный способ ремонта тисков позволит восстановить их работоспособное состояние, при этом можно будет сэкономить на приобретении новой дорогостоящей гайки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников И.А. Капитальный ремонт зажимов столярного верстака // Школа и производство. 2016. № 3. С. 18–20.
2. Муницын Л.И. Ремонт винта тисков столярного верстака // Школа и производство. 2012. № 8. С. 14–20.
3. Кученов Г.Г. Работа над проектом «Верстак столярный многофункциональный» // Школа и производство. 2014 № 8. С. 14–18.
4. Сиваченко Л.А. Современное технологическое машиностроение. Основные положения // Инженер-механик. 2010. № 4. С. 10–20.
5. Гончаров Д.А., Бондарев А.В. Совершенствование процесса технического обслуживания мобильной техники // Материалы международной студенческой научной конференции «Горинские чтения. Наука молодых – инновационному развитию АПК». Том 2. Белгород: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017. С. 30–31.
6. Клименко В.О., Сахнов А.В. Совершенствование стенда для ремонта агрегатов машин // Материалы международной студенческой научной конференции. Том 2. Белгород: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017. С. 37–38.
7. Бочаров М.С., Бондарев А.В. Разработка устройства для выпрессовки гильз цилиндров // Материалы Международной студенческой научной конференции «Горинские чтения. Наука молодых – инновационному развитию АПК». Том 3. п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. С. 124–127.
8. Мачкарин Р.И., Бондарев А.В. К вопросу защиты от коррозии сельскохозяйственных машин // Материалы Международной студенческой научной конференции «Горинские чтения. Наука молодых – инновационному развитию АПК». Том 3. п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. С. 143–145.
9. Титов Е.В., Бондарев А.В. Восстановление работоспособности узлов и агрегатов тракторов и автомобилей // Материалы Международной студенческой научной конференции «Горинские чтения. Наука молодых – инновационному развитию АПК». Том 3. п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. С. 155–157.
10. Баранов Л.Ф. Техническое обслуживание и ремонт машин: Учеб. пособие. (сер. «Учебники XXI века»). Ростов н/Д: Феникс, 2001. 416 с.
11. Lempe J. Gewindeschneiden oder Gewindeformen in der Kleinteilmassenfertigung. “Metallverarbeitung”. 1976. Nr. 5. Pp. 131–134.
12. Заявка на изобретение № 2022103761 Способ восстановления резьбовых соединений Сахнов А.В., Стребков С.В., Бондарев А.В., Новицкий А.С., Сахнова Л.Ю. заявл. 14.02.2022.
13. Заявка на изобретение №2022106776 Способ восстановления резьбового соединения Сахнов А.В., Стребков С.В., Бондарев А.В., Новицкий А.С., Сахнова Л.Ю. заявл. 15.03.2022.
14. Gary J. Reed Thread replacement system and device (Способ и устройство для замены резьбы). Patent US, No. 6382893 B1, 07.05.2002.
15. Газизов А.Ф., Дзюба В.И., Медведев В.И., Волков А.Е. Шлифование внутренней резьбы без наклона шпинделя инструмента // Журнал машиностроения и надежности. 2014. Т. 43. С. 422–428.

Информация об авторах

Сахнов Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса в АПК. E-mail: sakhnovav@mail.ru. Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, пос. Майский, ул. Вавилова, 1.

Фоменко Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: fomenko@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 208012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.04.2022 г.

© Сахнов А.В., Фоменко Ю.В., 2022

¹Sakhnov A.V., ²Fomenko Yu.V.¹Belgorod state agricultural University named after V. Gorin²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: sakhnovav@mail.ru

METHOD OF REPAIR OF THE LEAD SCREW NUT

Abstract. A vise is a device designed for fixing workpieces during machine or manual processing. Vises are widely used in the processing of materials made of metal, wood, plastic and other materials in single or small-scale production. The main parts of the vise are two sponges, one of which has the ability to move relative to the other. The possibility of movement is provided by the lead screw, which rotates in the nut of the lead screw, rigidly fixed in a fixed sponge with a pin. The most common reason for the failure of the vise is the turning of the screw in the nut, which eliminates the possibility of fixing the workpieces. In this case, the thread of the vise nut most often becomes unusable, while the screw practically does not wear out. This is explained by the fact that the screw and nut are made of different materials, and the screw is made more wear-resistant. To restore the nut, cut out of it, for example, with the help of an angle grinder, its threaded part, in the direction A-A. The thickness of the cutting wheel of the angle grinder should not be less than the thread pitch. The cut parts of the nut after connecting them on the screw must be "picked up" by welding. After "tacking" the cut parts of the nut by welding, it is necessary to unscrew the screw and weld the mated elements well. When welding, make sure that the welding bath does not damage the thread. The proposed method of repairing the vise will restore their working condition, while it will be possible to save on the purchase of a new expensive nut.

Keywords: vise, lead screw, lead screw nut.

REFERENCES

1. Kolesnikov I.A. Overhaul of joiner's bench clamps [Kapital'nyj remont zazhimov stolyarnogo verstaka]. Shkola i proizvodstvo. 2016. No. 3. Pp. 18–20. (rus)
2. Municyn L.I. Remont vinta tiskov stolyarnogo verstaka [Repair of a screw of a vice of a joiner's work-bench]. Shkola i proizvodstvo. 2012. No. 8. Pp. 14–20 (rus)
3. Kuchenov G.G. Work on the project «Multi-functional joiner's workbench» [Rabota nad proektom «Verstak stolyarnyj mnogofunkcional'nyj»]. Shkola i proizvodstvo. 2014. No. 8. Pp. 14–18 (rus)
4. Sivachenko L.A. Modern technological engineering. Basic provisions [Sovremennoe tekhnologicheskoe mashinostroenie. Osnovnye polozheniya]. Inzhener-mekhanik. 2010. No. 4. Pp. 10–20. (rus)
5. Goncharov D.A., Bondarev A.V. Improving the process of mobile equipment maintenance [Sovershenstvovanie processa tekhnicheskogo obsluzhivaniya mobil'noj tekhniki]. Materialy mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii (Belgorod, 7-8 fevralya 2017 g.). Vol. 2. Belgorod : Izdatel'stvo FGBOU VO Belgorodskij GAU. Pp. 30–31 (rus)
6. Klimenko V.O., Sakhnov A.V. Improvement of the stand for the repair of machine units [Sovershenstvovanie stenda dlya remonta agregatov mashin]. Materialy mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii (Belgorod, 7-8 fevralya 2017 g.). Tom 2. Belgorod : Izdatel'stvo FGBOU VO Belgorodskij GAU. Pp. 37–38 (rus)
7. Bocharov M.S., Bondarev A.V. Development of a device for pressing out cylinder liners [Razrabotka ustrojstva dlya vypressovki gil'z cilindrov] Materialy Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Gorinskie chteniya. Nauka molodyh – innovacionnomu razvitiyu APK» (18–19 marta 2020 goda): v 4 t. Vol. 3. p. Majskij: Izdatel'stvo FGBOU VO Belgorodskij GAU, 2019. Pp. 124–127. (rus)
8. Machkarin R.I., Bondarev A.V. On the issue of corrosion protection of agricultural machinery [K voprosu zashchity ot korrozii sel'skohozyajstvennyh mashin]. Materialy Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Gorinskie chteniya. Nauka molodyh – innovacionnomu razvitiyu APK» (18–19 marta 2020 goda): v 4 t. Vol. 3. p. Majskij: Izdatel'stvo FGBOU VO Belgorodskij GAU, 2019. Pp. 143–145. (rus)
9. Titov E.V., Bondarev A.V. Restoring the operability of components and aggregates of tractors and cars [Vosstanovlenie rabotosposobnosti uzlov i agregatov traktorov i avtomobilej]. Materialy Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Gorinskie chteniya. Nauka molodyh – innovacionnomu razvitiyu APK» (18–19 marta 2020 goda): v 4 t. Vol. 3. p. Majskij: Izdatel'stvo FGBOU VO Belgorodskij GAU, 2019. Pp. 155–157. (rus)
10. Baranov L.F. Maintenance and repair of machines [Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont mashin]. Rostov n/D: Feniks, 2001. 416 p. (rus)
11. Lempe J. Gewindeschneiden oder Gewindeformen in der Kleinteilmassenfertigung. "Metallverarbeitung". 1976. Nr. 5. Pp. 131–134

12. Zayavka 2022103761 Method of restoring threaded connections [Sposob vosstanovleniya rez'bovyh soedinenij]. Sakhnov A.V., Strebkov S.V., Bondarev A.V., Novitsky A. S., Sakhnova L.Yu. zayavleno 14.02.2022. (rus)

13. Zayavka 2022106776 Method of restoring threaded connections [Sposob vosstanovleniya rez'bovyh soedinenij]. Sakhnov A.V., Strebkov S.V., Bondarev A.V., Novitsky A. S., Sakhnova L.Yu. zayavleno 15.03.2022. (rus)

14. Gary J. Reed Thread replacement system and device. Patent US, No. 6382893 B1, 07.05.2002. (rus)

15. Gazizov A.F., Dzyuba V.I., Medvedev V.I., Volkov A.E. Grinding of the Inner Thread without Tilt of the Tool Spindle [Shlifovanie vnutrennej rez'by bez naklona shpindelya instrumenta]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2014. Vol. 43. No. 5. Pp.422–428.

Information about the authors

Sakhnov, Andrey V. PhD, Assistant professor. E-mail: sakhnovav@mail.ru. Belgorod state agricultural University named after V. Gorin. Russia, 308503, Belgorod, Belgorod district, village Mayskiy, Vavilova street, 1.

Fomenko, Yuliya V. PhD, Assistant professor. E-mail: fomenko@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.04.2022

Для цитирования:

Сахнов А.В., Фоменко Ю.В. Способ ремонта гайки ходового винта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 120–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-120-127

For citation:

Sakhnov A.V., Fomenko Yu.V. Method of repair of the lead screw nut. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 120–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-120-127