

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

12

2023

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**

№ 12, 2023 год

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

Vol. 12. 2023

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)
- 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	15.12.2023
Выход в свет	21.12.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,32. Уч.-изд. л. 18,63. Тираж 40 экз. Заказ № 173

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2023

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)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	15.12.2023

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, 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, академик 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).

Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии, организации и экономики строительства, Сибирский государственный университет путей сообщения (РФ, г. Новосибирск).

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).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, научный руководитель АО «КТБ Железобетон» (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

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

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

Лесовик Руслан Валерьевич, д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

Павленко Вячеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., 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., директор 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).

Полужкова Валентина Анатальевна – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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. кафедры градостроительства 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).

Сивенков Андрей Борисович, д-р техн. наук, проф., кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (РФ, г. Москва).

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).

Тиратуриян Артем Николаевич, д-р техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог, Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону).

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, Academician 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).

Valery S. Vorob'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Transport University (Russian Federation, Novosibirsk).

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).

Aleksey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, KTB Beton Group (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).

Ruslan V. Lesovik, 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).

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

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).

Andrey B. Sivenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia (Russian Federation, Moscow).

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).

Artem N. Tiraturyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Don State Technical University, (Russian Federation, Rostov-on-Don).

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

Сулейманов К.А.

ПОРЫ ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ГАЗОБЕТОНА 8

Есипов С.М., Турков А.В., Дьяченко А.Ю., Есипова Д.В.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНДАМЕНТА
В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСИЛИЯ
В ЭЛЕМЕНТАХ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ 16

Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х., Амелин П.А., Мохаммедали Т.Х.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПЕРЕМЫЧЕК ГАЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ 32

Фан Ч.Д.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН
ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПЛИТНЫХ И СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ 41

Алсих А.С.М.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЦЕНТРОВ В ЙЕМЕНСКОЙ
РЕСПУБЛИКЕ. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА 54

Спиридонов В.Ю.

ИНДИКАТОРЫ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ 67

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Прохоренков Д.С., Фанина Е.А., Линец В.В.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТЕКОЛ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВОЛОКНА, ПОЛУЧЕННЫХ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ 83

**Мишин Д.А., Дороганов В.А., Долгова Е.П., Таралло З.В., Евтушенко Е.И.,
Лукин Е.С.**

СПОСОБЫ СИНТЕЗА СИЛИКАТСОДЕРЖАЩЕГО КЛИНКЕРА
СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕМЕНТА 97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Савичев А.О., Шарапов Р.Р., Агарков А.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЕНИВАНИЯ БИТУМА В СМЕСИТЕЛЕ 106

Чумиков Ю.А., Родионов Ю.В., Скоморохова А.И., Соколов М.В.,

Гливенкова О.А., Сухова О.А.
ВЫБОР ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА ДЛЯ ШАРОВОЙ
МЕЛЬНИЦЫ С ВАКУУМНЫМ ОТВОДОМ 115

Шамгулов Р.Ю.

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА 124

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А.

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 138

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Suleymanov K.A. AIR EXTRACTION PORES IN THE STRUCTURE OF AERED CONCRETE	8
Esipov S.M., Turkov A.V., Diachenko A.Yu., Esipova D.V. THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FOUNDATION IN PERMAFROST CONDITIONS AND ITS EFFECT ON THE FORCES IN THE ELEMENTS OF THE ABOVEGROUND PART OF THE BUILDING	16
Suleymanova L.A., Adham A.H., Amelin P.A., Mohammedali T.K. RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF JUMPERS OF AERATED CONCRETE COMPOSITES	32
Phan Ch.D. APPLICATION OF THE BENDING WAVE METHOD FOR INSPECTION OF SLAB AND WALL STRUCTURES	41
Alseh A.S.M. PROSPECT FOR THE DEVELOPMENT OF PUBLIC CENTERS IN THE REPUBLIC OF YEMEN. ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE	54
Spiridonov V.Yu. INDICATORS OF TERRITORIAL AND SPATIAL REGIONAL DEVELOPMENT	67

CHEMICAL TECHNOLOGY

Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Prokhorenkov D.S., Fanina E.A., Linets V.V. IDENTIFICATION OF GLASS CRYSTALLIZATION PRODUCTS FOR THE PRODUCTION OF FIBERGLASS OBTAINED BASED ON MAN-MADE WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS	83
Mishin D.A., Doroganov V.A., Dolgova E.P., Tarallo Z.V., Evtushenko E.I., Lukin E.S. METHODS OF SYNTHESIS OF SILICATE-CONTAINING CLINKER DENTAL CEMENT	97

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Savichev A.O., Sharapov R.R., Agarkov A.M. STUDY OF THE FOAMING PROCESS OF BITUMEN IN THE MIXER	106
Chumikov Y.A., Rodionov Y.V., Skomorokhova A.I., Sokolov M.V., Glivenkova O.A., Sukhova O.A. SELECTION OF LIQUID RING VACUUM PUMP FOR BALL MILL WITH VACUUM OUTLET	115
Shamgulov R.Yu. DEVELOPMENT, RESEARCH AND PILOT INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF CARBON BLACK AGGLOMERATION TECHNOLOGY	124
Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. ENGINEERING ANALYSIS OF A ROBOTIC CELL OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION	138

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-8-15

Сулейманов К.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: karimsuleymanov@mail.ru

ПОРЫ ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ГАЗОБЕТОНА

Аннотация. Газобетон является одним из наиболее популярных строительных материалов, который обладает уникальными свойствами, такими как легкий вес, высокие звуко- и теплоизоляционные характеристики и показатели прочности. Однако его пористая структура может снижать его прочность и долговечность. В этой статье автором рассмотрены различные типы пор в газобетоне и их влияние на его свойства. Гелевые и капиллярные поры – это основные виды пор, которые образуются при производстве газобетона. Воздушные (газовые) поры образуются в результате химической реакции между газом и вяжущим веществом. Они также влияют на свойства газобетона, но в меньшей степени, чем гелевые и капиллярные. Однако поры воздухововлечения негативно влияют на качество газобетона. Данный вид пор образуется при заливке газобетонной смеси и представляют собой воздушные пузырьки, которые снижают прочность материала и ухудшают его теплоизоляционные свойства. Для улучшения качества газобетона и предотвращения образования пор воздухововлечения, необходимо оптимизировать технологии производства и контролировать процесс заливки. Также в статье рассмотрены особенности формообразования поры воздухововлечения и трансформации формы вовлеченного воздуха в поре воздухововлечения с формой перевернутой капли.

Ключевые слова: поры воздухововлечения, ячеистый бетон, газобетонная смесь, газовый пузырек, ячеистобетонная смесь, пористая структура.

Введение. Пористые материалы, такие как газобетон, представляют собой ключевой элемент в современном строительстве благодаря своей легкости, теплоизоляционным свойствам и прочности. Их структура, состоящая из множества пор различной формы и размеров, играет важную роль в обеспечении эксплуатационных характеристик. Однако, несмотря на широкое использование материалов и изделий из газобетона, вопросы, связанные с их пористой структурой, остаются малоизученными.

Пористая структура газобетона представляет собой комплексную сеть мельчайших пор, которые являются ключевыми элементами, определяющими его уникальные характеристики. Малоизученность пористой структуры газобетона обусловлена сложностью их анализа, особенно в масштабе наноструктур. Тем не менее, понимание размеров, форм и распределения пор является важным для оптимизации процессов производства и создания более совершенных материалов.

Поры – основной структурный элемент газобетона. При оценке влияния пористости на формирование технических характеристик ячеистобетонных изделий важно выявлять различные типы пор и определять их конкретные формы и размеры [1–3]. В особенности, в строительных материалах с использованием неорганических связующих важно выделять гелевую, капиллярную и газовую пористость [4–7].

Гелевая пористость связана с наличием геля в структуре материала. Гель образуется в результате химических реакций при процессе формирования газобетона. Эти поры имеют маленькие размеры и часто заполнены водой или другими жидкостями. Гелевая пористость играет важную роль в формировании внутренней структуры материала, влияя на его прочность, плотность и теплоизоляционные свойства. Капиллярная пористость обусловлена наличием микроскопических каналов, похожих на капилляры, которые возникают благодаря структуре материала, обеспечивая ему способность впитывать и удерживать влагу. Капиллярная пористость играет ключевую роль в регулировании влажности газобетона, его способности сохранять тепло и препятствовать проникновению воды и других жидкостей в материал. Газовые поры, как правило, заполнены газами, обычно воздухом. Газовые поры в газобетоне имеют различные размеры и формы, варьирующиеся от мельчайших до более крупных. Размер газовых пор существенно влияет на свойства материала: маленькие поры способствуют теплоизоляции, а более крупные могут влиять на прочность и легкость материала [8–11].

Гелевые поры составляют около 28 % объема цементного камня, а капиллярные поры – от 0 до 40 % в зависимости от водоцементного отношения и степени гидратации. Объем пор в бетоне, как характеристика его проницаемости, измеряют водопоглощением, которое обычно определяют высушиванием образца до постоянной

массы, насыщением водой и измерением увеличения массы в процентах к массе сухого образца. Высушивание при нормальной температуре неэффективно для удаления всей влаги, а высушиванием при высокой температуре можно удалить и часть связанной воды. Следовательно, водопоглощение не может служить критерием качества бетона, но большинство качественных бетонов имеет величину водопоглощения менее 10 %.

Изучение гелевой и капиллярной пористости позволяет формулировать основные принципы в контексте газобетона, в то время как анализ газовых пор позволяет классифицировать их и выявить, как размер пор влияет на образование структуры [12–14].

Поры воздухововлечения выделены в структуре газобетона в отдельный вид. Они представляют собой пространственные полости, размер которых колеблется от 2 до 30 мм и образуется в процессе заливки газобетонной смеси в формы. Эти поры являются дефектами структуры материала, и их формирование связано с технологическими процессами и условиями производства.

Исследование пористой структуры и пор воздухововлечения газобетона представляет значимый интерес в связи с несколькими аспектами. Прежде всего, это связано с поиском новых методов улучшения качества и характеристик газобетонных конструкций. Глубокое понимание пористой структуры может привести к разработке новых формул смесей и технологий производства,

направленных на улучшение прочности, теплоизоляции и долговечности материала. Кроме того, в контексте экологической устойчивости и энергоэффективности строительных материалов, изучение пористой структуры газобетона актуально для оптимизации энергопотребления в процессе производства и эксплуатации зданий.

Материалы и методы. Поры воздухововлечения образуются в текучих системах при смешении компонентов и замесах массы формы. Размер пор вдоль вертикальной оси в ячеистобетонных смесях составляет, как правило, величину от 2 до 30 мм. Воздух вовлекается в смесь в процессе перемешивания сырьевых компонентов и при заливке смеси в формы. Ни одна из конструкций сливных устройств между смесителем и формой не избавляет от воздухововлечения.

При литейной технологии производства ячеистобетонных изделий эффект воздухововлечения меньше, чем при ударной [15]. Пузырьки воздухововлечения приобретают в смеси форму «перевернутой капли» (рис. 1) и стремятся переместиться к поверхности, но не выходят из смеси ни на ударном столе, ни при виброобработке. Перемещение пузырьков воздуха вверх прерывается за счет их блокировки мелкими водородными пузырьками и по причине формирования коагуляционной структуры в твердеющей смеси. Радиус лобовой части пузырьков (R_1) больше, чем донной (R_2) и значительно меньше, чем у соединяющей их боковой поверхности (R_3): $R_3 \gg R_1 \gg R_2$.

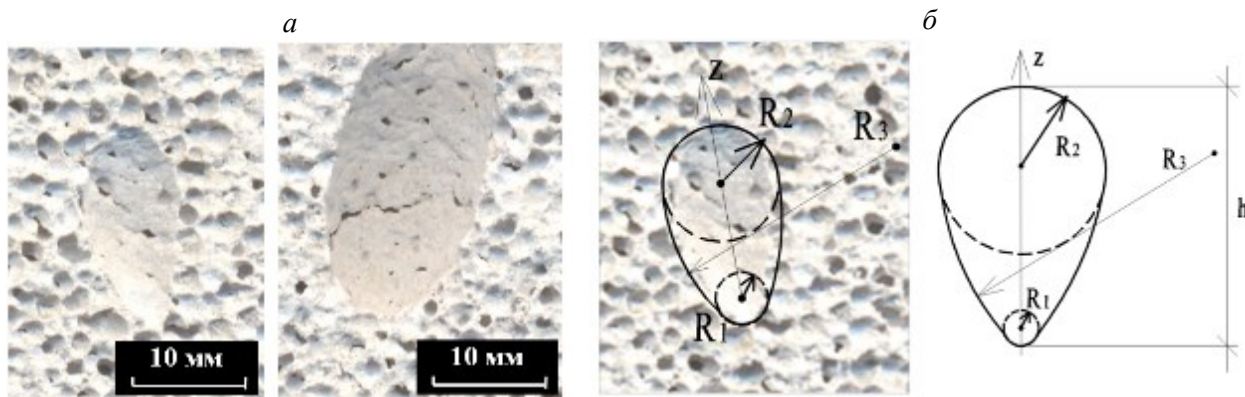


Рис. 1. Поры воздухововлечения:
а – в срезе по ячеистому бетону; б – форма пор

Крупные поры воздухововлечения являются существенными дефектами в структуре ячеистого бетона, исключение которых имеет критическое значение. Формирование таких пор приводит к нарушению целостности и равномерности внутренней структуры материала, что снижает его прочность и теплоизоляционные свойства. Поэтому важно избегать образования крупных пор воздухововлечения в процессе производства ячеистого бетона.

Определение статуса пор воздухововлечения как отличительной черты материала позволяет значительно расширить наши знания о формировании и организации ячеистой структуры. Это включает в себя не только выявление наличия крупных пор, но и анализ их распределения, формы и влияния на общую структуру материала. Углубленное изучение статуса этих пор позволяет разрабатывать более эффективные ме-

тоды контроля качества при производстве ячеистого бетона и улучшать технологии его производства для предотвращения образования дефектов, что в свою очередь способствует повышению его надежности и долговечности.

При производстве газобетона залитая в формы газобетонная смесь находится в турбулентном режиме до 10 секунд. Завершив перемещение и заняв горизонтальное положение в форме, смесь начинает подниматься вверх за счет протекающих физико-химических процессов газообразования. Важно отметить, что наблюдения показывают отсутствие видимых перемещений на бугристой поверхности. Эта бугристость, возникающая в начальный момент исходного турбулентного состояния смеси, почти не меняется до момента резки массива. Возвышения, выраженные на поверхности и достигающие высоты до 3 мм, объясняются наличием воздуха, вовлеченного в газобетонную смесь. Данные возвышения неизменны и сохраняют свою форму в течение времени, пока смесь не достигнет этапа резки массива. Такое поведение газобетонной смеси связано с процессами газообразования, увлека-

ющими воздух и формирующими бугры на поверхности. Данный этап перемещения смеси в форме является важным, так как он определяет структуру и характеристики готового ячеистого бетона. Важно отметить, что воздушный пузырь, который формирует бугорок на поверхности, четко наблюдается при разделении готового блока на срез. Это связано с процессом образования пор воздухововлечения и их влиянием на формирование структуры материала. Если после формирования массива в камере предварительного твердения проколоть бугорок на поверхности, то образуется углубление, или лунка. Это позволяет увидеть, как пора воздухововлечения располагается внутри готового блока. Визуальное наблюдение за поверхностью и фотосъемка показывают, что поры воздухововлечения не перемещаются. Пузырек, находящийся у поверхности, не прорывает ячеистобетонную смесь и не вызывает лопания, как это происходит с порами воздухововлечения в воде.

Поры воздухововлечения в газобетонных блоках в реальном масштабе представлены на рисунке 2.

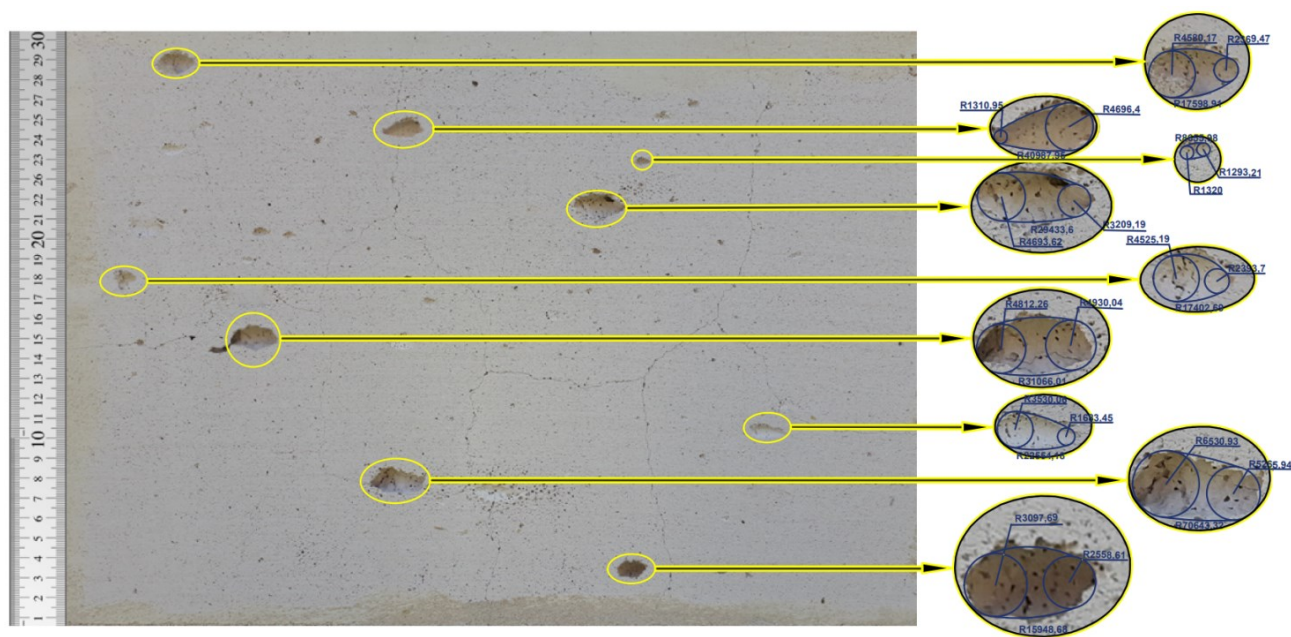


Рис. 2. Поры воздухововлечения в газобетонных блоках

Поры имеют три радиуса кривизны R_1 , R_2 , и R_3 . Размер пор зависит также от расстояния между центрами полусфер с R_1 и R_2 .

Результаты замеров 100 образцов пор воздухововлечения в срезах ячеистого бетона позволил выделить мелкие (до 50 мм/м³), средние (от 50 до 500 мм/м³) и крупные поры (500 мм/м³ и выше), а также характеристику равных по объему

сферических пор. Характер распределения пор по их объему представлен на рисунке 3.

Рассмотрен газовый пузырек радиусом $R_0 = 10$ мм в ячеистобетонной смеси. В начальный момент времени после заливки смеси в форму пузырек имеет сферический вид и расположен на глубине $L = 100$ мм от поверхности смеси (рис. 4, а).

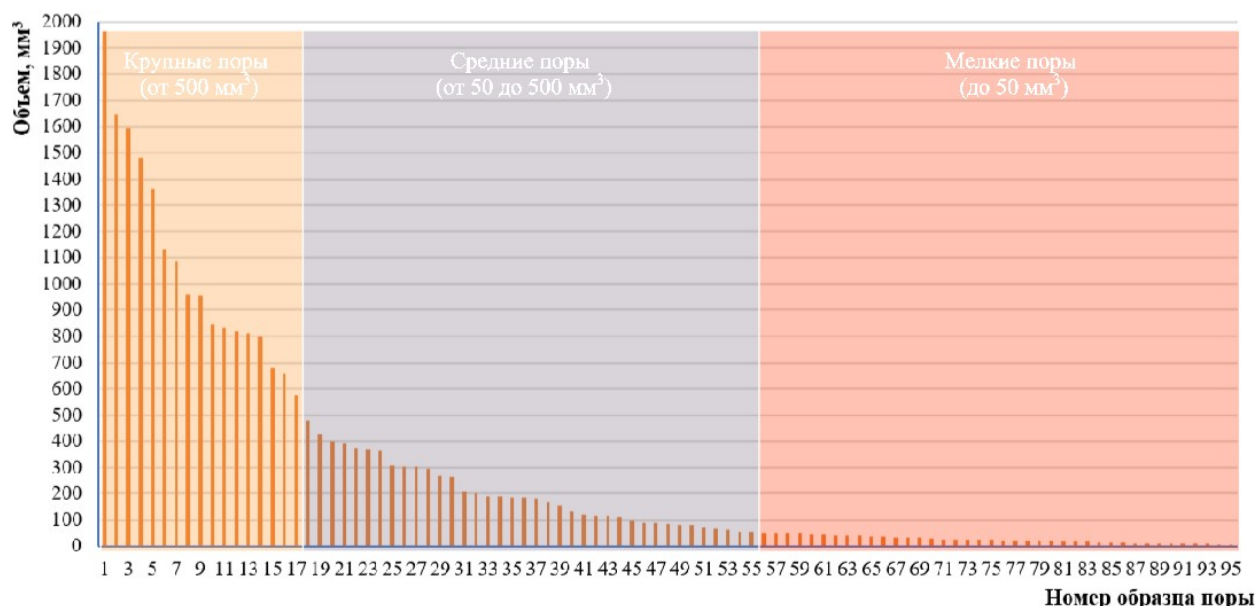


Рис. 3. Распределение пор воздухововлечения по объему

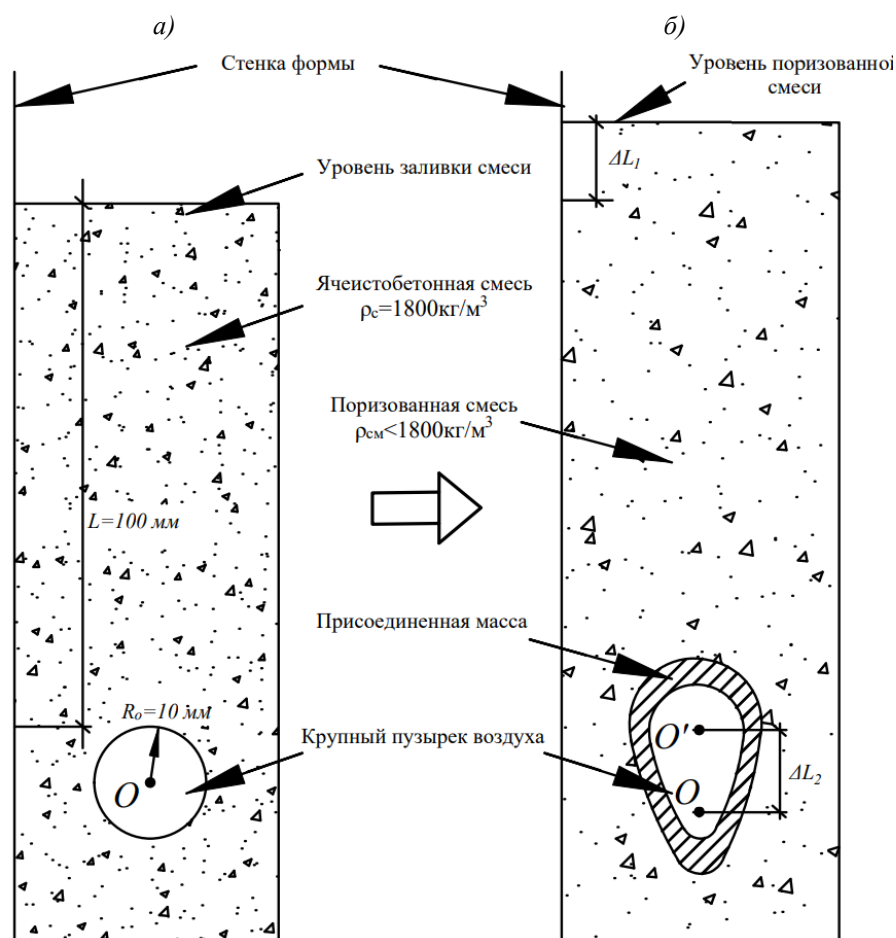


Рис. 4. Схема преобразования формы пор воздухововлечения в ячеистобетонной смеси:

a – гипотетический начальный момент; *б* – энергетически предпочтительное состояние

Основная часть. Потенциальная энергия газового пузырька обуславливает выталкивающую силу из-за различий плотностей воздуха ($\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$) и смеси ($\rho_c = 1800 \text{ кг/м}^3$). Так как $\rho_c \gg \rho_v$ архимедова сила:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho_c \quad (1)$$

Предположим, что рассматриваемая пора воздухововлечения сместится со своего первоначального положения к уровню заливки смеси, преодолев расстояние L . Смещение поры воздухововлечения с глубины к поверхности уменьшит потенциальную энергию пузырька:

$$\Delta E_a = -\frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho_c g L. \quad (2)$$

Величина границы раздела фаз между смесью и воздухом в пузырьке определяется площадью поверхности пузырька. Поверхность раздела фаз дает вклад в потенциальную энергию пузырька:

$$E_{\phi} = \sigma \cdot S, \quad (3)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз воздух-ячеистобетонная смесь, энергия единицы площади, поверхности; S – площадь поверхности.

Кривизна поверхности вносит вклад в энергию пор воздуха влечения за счет избыточного давления у искривленной поверхности. Лапласовское давление в поре воздуха влечения определяется по формуле:

$$P_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{R_0}. \quad (4)$$

$$E_{\phi} = 72,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (10^{-2})^2 = 9,14 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Энергия пузырька за счет выталкивающей силы рассчитана по формуле (2):

$$\Delta E_a = -\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (10^{-2})^3 \cdot 1800 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Полученное значение на два порядка выше энергии за счет межфазной границы.

Следовательно, ключевым фактором, влияющим на энергетическое состояние газового пузырька в газобетоне, является его потенциальная энергия, которая определяется уровнем смеси ячеистого бетона над порой воздуха влечения.

Характеристики окружающей поры воздуха влечения среды и количество вещества в этой среде, измеряемое через присоединенную массу, оказывают существенное влияние на поры воздуха влечения в газобетонной смеси. В традиционной теории присоединенная масса определяется как половина объема среды, вытесненной пузырьком, умноженная на плотность этой среды. Для сферического пузырька воздуха эту массу можно вычислить по формуле:

$$m_c = \frac{2}{3} \pi R_0^3 \rho_c. \quad (5)$$

Для рассматриваемого пузырька с радиусом $R_0 = 0,01$ м присоединяемый объем равен $V_0 = 2,09$ см³ или $2,09 \cdot 10^{-6}$ м³. С учетом начальной плотности смеси $\rho_c = 1800$ кг/м³ присоединенная масса составит $3,77 \cdot 10^{-3}$ кг.

На начальном этапе основной энергетической характеристикой, окружающей поры воздуха влечения среды, является температура ячеистобетонной смеси. Температура смеси при заливке равна 43 °С. Приняв температуру воздуха

Произведем количественную оценку каждого из трех рассмотренных составляющих в энергетический потенциал поры воздуха влечения в ячеистобетонной смеси. Вклад в энергию за счет кривизны поверхности.

Взяв для жидкой фазы ячеистобетонной смеси как для воды $\sigma = 72,75$ мДж/м² для поры воздуха влечения с $R_0 = 10$ мм по формуле (4), получим давление Лапласа 14,55 Па. Эта величина на четыре порядка ниже атмосферного давления $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Когда $P_0 \gg P_{\text{л}}$, внешнее атмосферное давление значительно выше лапласовского давления в пузырьке, пора воздуха влечения чувствительна к любому внешнему изменению давления и является по Я.Е. Гегузину [16] «мягкой». Энергетический потенциал поры воздуха влечения за счет кривизны поверхности незначительный.

Потенциальная энергия за счет межфазной границы определена по формуле (3):

в зоне заливки 25 °С, получаем разность температур 18 °С. Наличие градиента температур предопределяет передачу энергии от среды к воздуху, находящемуся в пузырьке. Градиент одинаков по всей поверхности сферы и приводит к нагреву воздуха в поре воздуха влечения.

Определим количество энергии, необходимой для нагрева воздуха в рассматриваемом пузырьке на один градус. Так как воздух влажный, теплоемкость определяем по уравнению:

$$C_p = 1005 + 1865 \cdot d, \quad (6)$$

где 1005 Дж/кг·град – удельная теплоемкость сухого воздуха при 25 °С; 1865 Дж/кг·град – удельная теплоемкость водяного пара; d – абсолютная влажность, кг водяного пара на кг сухого воздуха.

Содержание водяных паров в сухом воздухе принято 15 г. Масса сухого воздуха в поре воздуха влечения с $R_0 = 0,01$ м составит $[4,19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3] \cdot [1,29 \text{ кг/м}^3] = 5,4 \cdot 10^{-6}$ кг. Теплоемкость влажного воздуха в поре воздуха влечения: $1005 + 1865 \cdot 0,015 = 1033$ Дж/кг·град.

Энергия для градиента температуры в один градус для поры воздуха влечения составит: $1033 \cdot 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 5,58 \cdot 10^{-3}$ Дж. Для газобетонной смеси D500 объемная теплоемкость составляет $1,237 \cdot 10^6$ Дж/м³·град. Для присоединенного к поре воздуха влечения с $R_0 = 10$ мм объема газобетонной смеси, равного $2,09 \cdot 10^6$ Дж/м³·град

энергия при градиенте температуры в один градус: $1,237 \cdot 10^6 \cdot 2,09 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 2,59$ Дж.

Следовательно, передача энергии от присоединенной массы поры воздухововлечения, при изменении температуры газобетонной смеси на 1°C с 43°C до 42°C достаточна, чтобы нагреть воздух в поре практически до 1000°C .

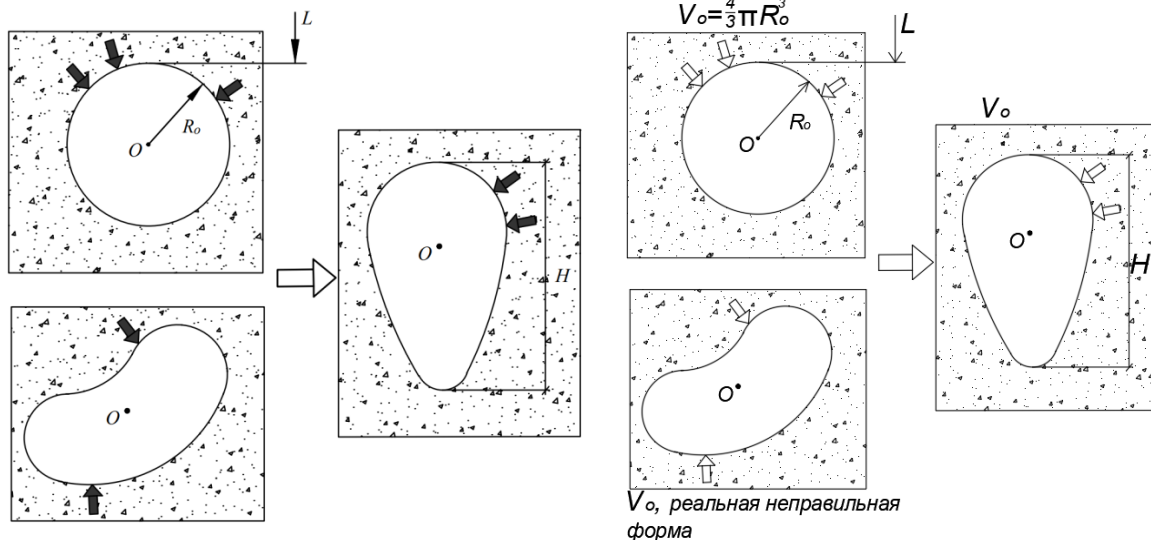


Рис. 5. Схема трансформации формы вовлеченного воздуха в поре воздухововлечения с формой перевернутой капли

Вывод. Занимающие значительную часть пространства в ячеистых бетонах поры оказывают влияние на строительно-технические свойства газобетона, в том числе теплоизоляционные. Поры воздухововлечения являются дефектами структуры газобетона и влияют на снижение его прочности и долговечности. Для улучшения качества газобетона и предотвращения образования пор воздухововлечения, необходимо оптимизировать технологии производства и контролировать процесс заливки.

Изучение пористой структуры и выявление дефектов в порах газобетона представляет собой важный этап для повышения качества и надежности строительных конструкций. Определение дефектов позволяет не только улучшить технологии производства газобетона, но и разработать методы обнаружения и контроля этих дефектов на всех стадиях производства материалов. Углубленное понимание пористой структуры и ее дефектов открывает новые перспективы для создания более эффективных строительных материалов с повышенной устойчивостью и долговечностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dong M., Ma R., Sun G., Pan C., Zhan S., Qian X., Chen R., Ruan S. Size distribution of pores

Уже на момент контакта пор воздухововлечения с окружающей его горячей газобетонной смесью пузырек с воздухом подвержен мощному энергетическому воздействию со стороны окружающей его среды. В таких условиях пора воздухововлечения примет энергетический статус, соответствующий минимуму его потенциальной энергии. Это форма перевернутой капли (рис. 5).

and their geometric analysis in red mud-based autoclaved aerated concrete (AAC) using regression neural network and elastic mechanics // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 359. 129420.

2. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 3 (639). С. 10–20.

3. Suleymanova L.A., Kara K.A., Suleymanov K.A., Pyrvu A.V., Netsvet D.D., Lukutsova N.P. The topology of the dispersed phase in gas concrete // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 18. Iss. 10. Pp. 1492–1498.

4. Huang Y., Ma L., Lai W., Mo Q., Zheng Y., Li Y., Xu M., Huang Z. Mechanical properties improving and microstructure characterization of inorganic artificial stone binder // Science and Engineering of Composite Materials. 2022. Vol. 29. Iss. 1. Pp. 335–345.

5. Kurochkina K., Suleymanova L., Kolomatsky A. Porosity of autoclave aerated concrete and foam concrete: origin of porosity and pore size // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 6 (106). 10606.

6. Kramer Ch., Schauerte M., Kowald T.L., Trettin R.H.F. Three-phase-foams for foam concrete application // Materials Characterization. 2015. Vol. 102. Pp. 173–179.

7. Anders N. Investigations about porosity analyzing of AAC // 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. 2018. Pp. 141–145.
8. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Сулейманов К.А. Обобщенный анализ характера поровой структуры газобетонов неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 75–79.
9. Сулейманова Л.А., Сулейманов К.А., Погорелова И.А. Топология пор в газобетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 100–105.
10. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.
11. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Theoretical Basis of Formation Highly Organized Porous Structure of Aerated Concrete // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 309–317.
12. Gadkar A., Subramaniam K. Porosity and pore structure control in cellular geopolymer using rheology and surface tension modifiers // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 323. 126600.
13. Kumar R., Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Issue 1. Pp. 155–164.
14. Suleymanova L.A., Marushko M.V., Kolomatsky A.S. Processing methods used to create high-quality porous structure of aerated concrete // Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. Pp. 212–217.
15. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И. Выбор технологии производства автоклавного газобетона: ударная или литевая // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 4–7.
16. Гегузин Я.Е. Капля. АН СССР. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1977. 176 с.

Информация об авторах

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

Поступила 10.11.2023 г.

© Сулейманов К.А., 2023

Suleymanov K.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: kloud09@mail.ru

AIR EXTRACTION PORES IN THE STRUCTURE OF AERED CONCRETE

Abstract. Aerated concrete is one of the most popular building materials, which has unique properties such as light weight, high sound and heat insulation characteristics and strength. However, its porous structure may reduce its strength and durability. In this article, the author examines the various types of pores in aerated concrete and their effect on its properties. Gel and capillary pores are the main types of pores that are formed during the production of aerated concrete. Air (gas) pores are formed as a result of a chemical reaction between gas and binder. They also affect the properties of aerated concrete, but to a lesser extent than gel and capillary ones. However, air entrainment pores negatively affect the quality of aerated concrete. This type of pore is formed when pouring an aerated concrete mixture and represents air bubbles that reduce the strength of the material and impair its thermal insulation properties. To improve the quality of aerated concrete and prevent the formation of air entrainment pores, it is necessary to optimize production technologies and control the pouring process. The article also discusses the features of the formation of an air entrainment pore and the transformation of the shape of entrained air in an air entrainment pore with the shape of an inverted drop.

Keywords: air entrainment pores, cellular concrete, aerated concrete mixture, gas bubble, cellular concrete mixture, porous structure.

REFERENCES

1. Dong M., Ma R., Sun G., Pan C., Zhan S., Qian X., Chen R., Ruan S. Size distribution of pores and their geometric analysis in red mud-based autoclaved aerated concrete (AAC) using regression neural network and elastic mechanics. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 359. 129420.
2. Lesovik V.S., Suleymanova L.A., Kara K.A. Energy-efficient aerated concrete with composite binders for monolithic construction [Energoeffek-

tivnye gazobetonny na kompozicionnyh vyazhushchih dlya monolitnogo stroitel'stva]. News of higher educational institutions. Construction. 2012. No. 3 (639). Pp. 10–20. (rus)

3. Suleymanova L.A., Kara K.A., Suleymanov K.A., Pyrvu A.V., Netsvet D.D., Lukutsova N.P. The topology of the dispersed phase in gas concrete. Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 18. Iss. 10. Pp. 1492–1498.

4. Huang Y., Ma L., Lai W., Mo Q., Zheng Y., Li Y., Xu M., Huang Z. Mechanical properties improving and microstructure characterization of inorganic artificial stone binder. Science and Engineering of Composite Materials. 2022. Vol. 29. Iss. 1. Pp. 335–345.

5. Kurochkina K., Suleymanova L., Kolomatsky A. Porosity of autoclave aerated concrete and foam concrete: origin of porosity and pore size. Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 6 (106). 10606.

6. Kramer Ch., Schauerte M., Kowald T.L., Trettin R.H.F. Three-phase-foams for foam concrete application. Materials Characterization. 2015. Vol. 102. Pp. 173–179.

7. Anders N. Investigations about porosity analyzing of AAC. 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. 2018. Pp. 141–145.

8. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A. Generalized analysis of the nature of the pore structure of non-autoclaved aerated concrete using composite binders [Obobshchennyj analiz haraktera porovoj struktury gazobetonov neavtoklavnogo tverdeniya na kompozicionnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2016. No 3. Pp. 75–79. (rus)

9. Suleymanova L.A., Suleymanov K.A., Pogorelova I.A. Topology of pores in aerated concrete

[Topologiya por v gazobetone]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2016. No 5. Pp. 100–105. (rus)

10. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete [Upravlenie processom formirovaniya poristoj struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)

11. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Theoretical Basis of Formation Highly Organized Porous Structure of Aerated Concrete. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 309–317.

12. Gadkar A., Subramaniam K. Porosity and pore structure control in cellular geopolymer using rheology and surface tension modifiers. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 323. 126600.

13. Kumar R., Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33/ Issue 1. Pp. 155–164.

14. Suleymanova L.A., Marushko M.V., Kolomatsky A.S. Processing methods used to create high-quality porous structure of aerated concrete. Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. Pp. 212–217.

15. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I. Choice of technology for the production of autoclaved aerated concrete: impact or injection [Vybor tekhnologii proizvodstva avtoklavnogo gazobetona: udarnaya ili lit'evaya]. Construction materials. 2015. No. 8. Pp. 4–7. (rus)

16. Geguzin Ya.E. A drop [Kaplya]. 2nd ed., add. M.: Nauka, 1977. 176 p. (rus)

Information about the authors

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

Received 10.11.2023

Для цитирования:

Сулейманов К.А. Поры воздухововлечения в структуре газобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-8-15

For citation:

Suleymanov K.A. Air entrainment pores in the structure of aerated concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-8-15

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31

^{1,*}Есипов С.М., ²Турков А.В., ¹Дьяченко А.Ю., ¹Есипова Д.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Орловский Государственный университет им. И.С. Тургенева

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНДАМЕНТА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены примеры объемно-планировочных и конструктивных решений каркасных зданий при строительстве в регионах с вечной мерзлотой. Проанализированы наиболее типовые схемы и методики решения задач, связанных с компенсацией деформаций при циклических замораживаниях и оттаиваниях, температурным влиянием на состояние фундаментов, а также составлением расчетных схем фундаментов и надфундаментных конструкций с учетом факторов действительной эксплуатации. Освещена проблематика оценки технического состояния фундаментов и составления математических моделей для расчета конструкций методом конечных элементов в условиях вечной мерзлоты. Разработана программа численных экспериментальных исследований, позволяющая получить искомые зависимости напряженно-деформированного состояния и создать расчетную модель, адекватно отвечающую реальной эксплуатации конструкций в вечной мерзлоте. Приведены разработанные авторами матрицы варьируемых факторов, на основании расчета по которым возможно выполнить учет дополнительных факторов, возникающих в конструкциях при нарушении однородности мерзлого основания. Даны предпосылки по составлению наиболее корректной расчетной схемы для моделирования поведения фундаментов на мерзлых грунтах. Предложена методика учета возможных температурных осадок основания на распределение внутренних силовых факторов в надфундаментной конструкции.

Ключевые слова: вечная мерзлота, каркасная система, напряженно-деформированное состояние, осадка, основания.

Введение. Интенсивное развитие методов строительства в условиях вечной мерзлоты с двадцатого века позволило существенно расширить экономическую деятельность, а также способствовало активному росту строительства городов в северной части России. Здесь созданы такие крупные городские промышленные комплексы, как Якутский, Воркутинский, Норильский и Магаданский. В связи с тем, что большое количество ресурсов нашей страны залегают в недрах северных регионов, нельзя оспорить актуальность строительного освоения территорий, расположенных в УВМ. Однако повышение плотности застройки, в свою очередь, приводит к изменению свойств оснований самих сооружений и негативно сказывается на их устойчивости. Также в исследованиях российских мерзловедов конца XX–начала XXI в. особое внимание уделялось влиянию потепления климата на прочность и устойчивость мерзлых оснований [1–5].

Дальнейшее освоение территории, расположенной на мерзлых грунтах, а также поддержание функционирования уже имеющейся инженерной инфраструктуры требуют углубленного изучения закономерностей взаимодействия возводимых зданий с мерзлым основанием. В связи с возрастанием темпов освоения регионов в УВМ вопросы повышения устойчивости, надежности и

долговечности сооружений, возводимых в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях, приобретают большое практическое значение.

Для оптимизации подходов к проектированию зданий и сооружений в северных широтах первостепенной задачей является изучение влияния отдельных процессов на строительство, определение мерзлотно-гидрогеологических особенностей грунта с целью и выявления наиболее оптимальных путей решения проблемы возведения зданий в сложных инженерно-геологических условиях. При разработке обоснования проектных решений возведения зданий в условиях холодных регионов целесообразно выполнять проектные и технологические проработки вариантов устройства фундаментов с достаточным запасом и учетом всех негативных процессов, возникающих в многолетнемерзлых грунтах [1].

Необходимость выполнения совместных расчетов особенно важна для современного уровня развития строительной науки, при котором благодаря внедрению современных методов расчетов и новейших материалов была достигнута возможность проектирования строительных конструкций с минимальными запасами прочности. В таких условиях незначительное увеличение напряжений за счет совместной работы здания и основания может приводить к появлению

трещин и снижению общей надежности конструкции [6–9].

Для учета совместной работы надфундаментных конструкций и фундаментов на деформируемом основании необходимо создать объективный и надежный математический аппарат исследования элементов, учитывающий совместно изменяющееся во времени напряженно-деформированное состояние элементов каркаса. Данное обстоятельство способствует более пристальному вниманию к применяемым технологиям и материалам с учетом максимального использования инновационных разработок.

Целью исследования является определение особенностей строительства зданий в условиях вечной мерзлоты, изучение влияния фундаментов и грунтов в УВМ на напряженно-деформированное состояние надземной части здания. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) выполнить анализ результатов исследований научных публикаций по данной теме; 2) проанализировать влияние взаимодействия грунтов и фундамента в условиях вечной мерзлоты на НДС каркаса здания; 3) разработать компьютерную модель для выполнения исследований взаимодействия системы "основание-фундамент-сооружение" в средних широтах и районах вечной мерзлоты; 4) исследовать на расчетной модели механизмы взаимодействия системы, оценить параметры НДС.

Объект исследования представляет собой взаимодействие под нагрузкой надземной части, в виде каркаса здания, с фундаментной конструкцией и грунтами основания в УВМ и при ее отсутствии. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние элементов каркаса.

Материалы и методы. Основными методами исследования стали комплексный подход к изучению текстового, иллюстративного материала в отечественных и зарубежных строительных изданиях, позволивший выявить тенденции проектирования, а также ряд сравнительных характеристик. В качестве материалов для исследования используются нормативно-правовые источники, доклады, статьи, книги и методические рекомендации. Применяемый теоретический метод исследования, опирается на комплексный подход. Он включает в себя изучение работ по исследованию вопросов разработки оптимальных конструктивных решений зданий на мерзлых грунтах и их применение на практике; анализ существующей нормативно-правовой документации и конкретных примеров реализации конструктивно-технических требований на территории субъектов Российской Федерации, расположен-

ных в УВМ. Все это позволило выявить предпосылки основных правил строительства зданий на вечной мерзлоте, определить проблематику и сформировать план для дальнейшего исследования с помощью численного моделирования в программных комплексах ЛИРА-САПР, САП-ФИР.

Основная часть. Весомый вклад в исследования строительства в условиях вечной мерзлоты внес коллектив научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича – институт ОАО «НИЦ «Строительство». Институтом были разработаны теория и методы расчета оснований и фундаментов по первому и второму принципу на вечномерзлых грунтах, обоснованы методы устойчивого строительства на этих грунтах и принципы использования их в качестве оснований зданий и сооружений.

Первоначальный опыт строительства на вечной мерзлоте показал, что богатая льдом вечная мерзлота неспособна поддерживать теплогенерирующие сооружения, построенные с использованием стандартных инженерных методов. Сооружения, возведенные в период 1935–1937 годов, получили деформации, вызванные неравномерной осадкой тающих ледяных отложений всего через несколько лет после строительства. В результате правила строительства на вечной мерзлоте, изданные в 1939 году, прямо запрещали строительство из несъемного бетона и кирпичные сооружения на замерзших отложениях с любым обнаруживаемым количеством грунтового льда. Под строительство промышленных объектов искали только скальные основания, но их было мало (рис. 1) [1].

Строительство полностью функционирующих северных городов началось в конце 1940-х годов. Согласно этим планам, города должны были включать 3–5-этажные кирпичные здания в неоклассическом стиле, расположенные в 7–10 прямоугольных городских кварталах, каждый площадью от 1,5 до 4 гектаров. Строительные работы включали ручную выемку замерзшего осадочного материала и возведение типичных отапливаемых подвалов на скальной породе. В районах с толстым осадочным слоем (>10 м) фундаменты не были сплошными, а состояли из нескольких бетонных опор 2×2 м, закрепленных на скальной породе и служащих основанием для горизонтальных балок, поддерживающих здания [2].

Несмотря на прочный скальный фундамент, проблемы, связанные с вечной мерзлотой, возникли сразу после строительства. Осадки образо-

вывались вокруг отопляемых подвалов и способствовали накоплению воды, вызывая регулярное затопление подвалов. В качестве меры по

смягчению последствий пришлось переоборудовать сложную дренажную систему вокруг каждого здания.



Рис. 1. Строительство Норильского медно-никелевого комбината

[Источник: https://kislorod.life/question_answer/kak_v_norilske_nauchilis_stroit_na_merzlote/]

На основе этого первоначального опыта были разработаны три руководящих принципа городского планирования на вечной мерзлоте [2]:

1) Чтобы свести к минимуму негативные последствия таяния вечной мерзлоты, все инженерные коммуникации должны быть размещены в одном подземном коллекторе, проходящем по центру улиц на расстоянии не менее 10–12 м от зданий.

2) Чтобы свести к минимуму плотность инженерных сетей, здания должны быть как можно больше и иметь свободный доступ к улицам с коммунальными службами.

3) Использование неотапливаемых, вентилируемых подвалов предпочтительнее для всех зданий.

В 1956 году Владимир Ким предложил более эффективный метод строительства на вечной мерзлоте. Этот фундамент состоял из нескольких рядов железобетонных свай, вмерзших в вечную мерзлоту, и набора бетонных балок (ростверков), уложенных поверх фундаментных свай на высоте 1,2–1,8 м над землей (рис. 2). Подъема ростверка эффективно обеспечивал свободную вентиляцию для отвода тепла, выделяемого конструкцией, от земли, подверженной вечной мерзлоте [3].



Рис. 2. Дом с конструкцией свайного фундамента с высоким ростверком в г. Якутске

[Источник: <https://ardexpert.ru/article/5072>]

С 1959 года свайный фундамент стал доминирующим методом строительства на вечной мерзлоте. Этот метод строительства был в три раза быстрее, требовал в 6–10 раз меньше рабочей силы и был вдвое дешевле фундаментов типа "столб на подушке" и "столбы на скальной породе", которые ранее использовались. Это способствовало ускорению темпов развития северных городов. В период 1960–1990 годов ежегодно возводилось примерно 18–20 новых жилых зданий. Первоначально большинство сооруже-

ний состояли из пятиэтажных бетонных панельных зданий, позже высота зданий увеличилась до 9–12 этажей (рис. 3) [4].

При проектировании и строительстве зданий в условиях вечной мерзлоты следует придерживаться основных принципов их возведения [5–9]:

1. Несущие и ограждающие строительные конструкции выполняются, как правило, с максимальной степенью сборности и тенденцией к применению легких транспортабельных и быстро возводимых изделий и деталей.

2. Особое внимание уделяется теплозащитным свойствам наружных ограждающих конструкций остовов зданий. Утепленные наружные ограждающие конструкции стен, заполнение дверных и оконных проемов изготавливаются воздухонепроницаемыми. Конструкции окон и

дверей применяются с обязательным утеплением притворов. В соответствии с теплотехническими расчетами в районах Крайнего Севера применяется тройное остекление в оконных и витражных блоках.

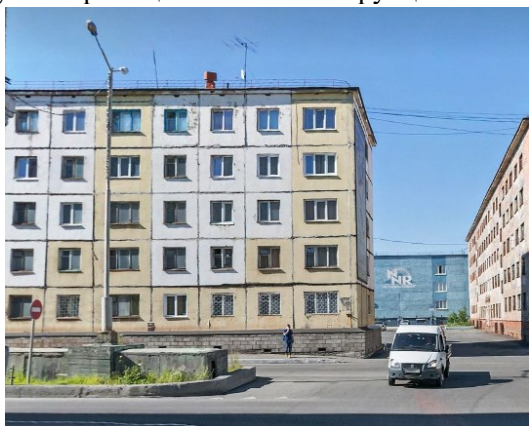


Рис. 3. Пятиэтажные и девятиэтажные жилые здания из бетонных панелей в г. Норильске
[Источник: <https://kurl.ru/dNeiD>]

3. Геометрия крыш зданий выбирается не сложной формы и простого профиля, что исключает образование больших снеговых отложений «снеговых мешков». Наружные боковые поверхности фасадов зданий выполняют плоской или криволинейной формы, без усложнений задерживающих снег.

4. В районах с наиболее суровым климатом продолжительного зимнего периода, современными нормативными источниками не допускается устройство лоджий и балконов (рис. 4). При проектировании входных групп гражданских и общественных зданий предусматриваются двойные тамбуры.



Рис. 4. Дома без балконов в г. Норильске
[Источник: <https://masterok.livejournal.com/6892492.html>]

5. В приоритете проектные решения, в которых при максимальном сохранении функционального назначения и основных технологических процессов здания или сооружения, обеспечивается минимальная боковая поверхность, контактирующая с морозным воздухом. При проектировании предпочтение отдается простым в плане и по высоте геометрическим формам контуров зданий.

6. В зданиях с жесткой конструктивной схемой устраивают поэтажные железобетонные, или

армокирпичные пояса, связанные с перекрытиями. Кроме того, продольные и поперечные стены рекомендуется располагать симметрично относительно главных осей здания, не допуская излома стен в плане и ослабления их нишами и каналами. Поперечные несущие стены или рамы располагают на расстоянии не более 12 м друг от друга. Проемы в стенах принимают одинаковых размеров и размещают их равномерно.

7. Для зданий с податливой конструктивной схемой применяют разрезные конструкции с минимально допускаемыми жесткостями на изгиб и сдвиг в вертикальной плоскости. Многоэтажные и одноэтажные здания с пролетами до 12 м, как правило, проектируют по жесткой конструктивной схеме, а одноэтажные с пролетами более 12 м – по податливой схеме.

Что касается проектирования оснований и фундаментов зданий, возводимых в условиях вечной мерзлоты, работа выполняется на основе результатов специальных инженерно-геологических изысканий, которые включают специальные геокриологические и гидрогеологические изыскания. Они учитывают конструктивные и технологические особенности проектируемых сооружений, их тепловое и механическое взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами оснований и возможные изменения геокриологических условий в результате строительства и эксплуатации [10–16].

Использование вечномерзлых грунтов в качестве основания зданий базируется на двух принципах. Первый принцип заключается в сохранении мерзлого состояния грунта. Его целью является сохранение первоначального состояния основания не только во время строительства, но и на протяжении всей эксплуатации здания. Для этого предпочтительно применять свайный или столбчатый фундамент, при условии, что верхний слой грунта не изменит своих свойств под воздействием тепла от здания. Для этого подполье делают холодным и вентилируемым. Предусматривают продухи в забивке или цокольной части дома. Такая система позволяет осуществлять естественную вентиляцию и поддерживать оптимальные условия в подполье, что в свою очередь обеспечивает сохранение грунта в мерзлом состоянии (рис. 5). Также возможен вариант выполнения сплошного слоя теплоизоляции с высокими изоляционными свойствами под всей площадью здания [17–20].



Рис. 5. Проветриваемое подполье в жилом доме
[Источник: <https://dzen.ru/a/ZF-4jF4IjXaBqpV7>]

Второй принцип допускает последующее оттаивание грунта. Этот метод применяется не так

часто. Необходимо убедиться, что грунт на строительной площадке не обладает высокими пучинистыми и просадочными свойствами, в виду чего в процессе изменения температуры могут произойти значительные деформации. Грунт предварительно оттаивают перед установкой фундамента, либо проводят все необходимые расчеты и допускают, что основание сможет оттаивать во время использования постройки [21–23].

При строительстве на вечномерзлом грунте, определение правильной глубины заложения фундаментов играет важную роль. Для различных типов фундамента это значение отличается [24]:

- при использовании свайных фундаментов, глубина заложения должна быть на два метра больше, чем толщина слоя грунта, который подвергается сезонным оттаиваниям и промерзаниям. Расчет основывается на предположении, что вечномерзлый грунт обеспечит требуемое значение сопротивления на сжатие.

- для всех остальных типов фундаментов, глубина заложения должна быть больше на один метр, чем толщина сезонно оттаивающего слоя грунта.

- при возведении здания на насыпном грунте с определенными характеристиками, значение глубины закладки подошвы не нормируется и определяется исходя из условий строительства.

Основным типом фундаментов для вечномерзлых грунтов являются висячие сваи, обеспечивающие несущую способность за счет смерзания боковой поверхности с грунтом и опирания острия сваи. Анализ литературы показал, что необходимо стремиться к созданию буроопускных свай с неровной боковой поверхностью, так как именно эта конфигурация позволяет существенно увеличить несущую способность грунтов основания. Грунт под рёбрами таких свай работает на сжатие, что намного эффективнее, чем работа грунта на сдвиг по поверхности смерзания с материалом обычной буроопускной сваи [25–30].

Однако бывают случаи, когда целесообразнее всего применить другой тип фундаментов. Например, когда здание возводится на подсыпке, на площадках с неглубоким залеганием кровли разрушенных скальных пород применяются сборные столбчатые фундаменты.

Ленточные фундаменты применяют в том случае, когда их подошвы проектируются в пределах насыпи из непучинистых грунтов. В районах Крайнего Севера Российской Федерации наибольшее распространение получили ленточ-

ные фундаменты на песчаных подсыпках с применением теплоизоляционных материалов. Это позволяет снизить затраты труда и денежных средств, более равномерно воспринимать деформации.

Известно также применение поверхностных вентилируемых пространственных фундаментов – оболочек. Они обладают рядом преимуществ, среди которых: совместимость функции несущей и охлаждающей грунт конструкции; возведение фундаментов без нарушения мерзлотно-грунтовых условий на строительных площадках. Это значительно упрощает процесс строительства, позволяя сэкономить время и ресурсы. Такой подход является эффективным решением для различных строительных объектов и помогает ликвидировать временной технологический разрыв, который необходим при устройстве свай, что обеспечивает более эффективную организацию работ [31–37].

Разработка эффективных фундаментов в виде вентилируемых оболочек для строительства на вечномёрзлых грунтах была проведена под руководством Гончарова Ю.М. Так в конце 1980-х годов в городе Игарка Красноярского края для строительства теплого гаража-стоянки транспортного предприятия, была разработана инновационная конструкция – пространственный вентилируемый сборно-монолитный фундамент-оболочка в сочетании с вентиляционными каналами (рис. 6). Главной целью данного проекта было снижение или полное исключение сезонного оттаивания подстилающих мерзлых грунтов основания [38].



Рис. 6. Часть строящегося здания АБК на поверхностном фундаменте-оболочке в г. Норильск
[Источник: <https://kurl.ru/yQdKX>]

Вопросам совершенствования теоретических моделей взаимодействия фундамента с грунтовым основанием, выбора наиболее адекватных расчетных методов оценки осадок фундаментов, экспериментального исследования деформативности грунтов посвящено большое количество исследований. Для того, чтобы появилась возможность учитывать деформацию оснований как можно точнее, необходимо оценить их

влияние на НДС зданий. Не редко труднодоступность района строительства обусловлена сложностью грунтовых условий относящихся к ряду «неудобных», как вечномёрзлые грунты. С этих позиций, становится весьма актуальным проблема учета влияния неравномерных деформаций основания на напряженно-деформированное состояние (НДС) верхнего строения, а именно, на работу пространственных конструкций [39–43].

При определении напряженно-деформированного состояния (НДС), с одной стороны, встает вопрос об учете ярко выраженных реологических свойств мерзлых грунтов, так как при действии внешней нагрузки в мерзлых грунтах всегда возникают необратимые перестройки структуры, вызывающие релаксацию напряжений и деформацию ползучести даже при очень небольших нагрузках, то есть изменение прочностных и деформационных свойств мерзлых грунтов во времени. С другой стороны, в настоящее время не существует единой общепринятой теории, которая позволяла бы определить НДС грунтовой среды с учетом всех свойств конкретного грунта, поэтому в инженерных расчетах используется главным образом теория линейно-деформированной сплошной среды. Так как пересчет НДС планируется производить каждый месяц выбранного интервала прогноза (каждый месяц), и параметры среды будут меняться, то учет реологических свойств грунтов в небольшом интервале времени можно не учитывать в виду малости значений этих изменений.

Все основания и фундаменты (также в условиях вечной мерзлоты) следует рассчитывать на силовые воздействия по двум группам предельных состояний: по первой — по несущей способности и второй — по деформациям (осадкам, прогибам и пр.), затрудняющим нормальную эксплуатацию конструкций и оснований или снижающим их долговечность, а элементы железобетонных конструкций — и по трещиностойкости.

К первой группе предельных состояний основания относятся:

- потеря формы и положения;
- хрупкое или вязкое разрушение;
- разрушение под совместным действием силовых факторов и не благоприятных факторов внешней среды;
- резонансные колебания;
- чрезмерное развитие пластических деформаций.

Ко второй группе предельных состояний относятся:

- состояния основания, затрудняющие нормальную эксплуатацию здания или сооружения;
- состояния основания, снижающие долго-

вечность здания или сооружения вследствие появления недопустимых перемещений (осадок, прогибов, углов поворота).

Однако при расчете фундаментов в мерзлых грунтах следует учитывать действие дополнительных факторов, преобладающих в УВМ. Так при проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах, должны выполняться статические и теплотехнические расчеты. При этих расчетах следует учитывать принятый в проекте принцип использования вечномерзлых грунтов в качестве основания и взаимное тепловое и механическое воздействия здания (сооружения) и основания.

Целью статического расчета является обеспечение прочности и устойчивости, а также эксплуатационной надежности здания или сооружения. Целью теплотехнического расчета является определение необходимого теплового режима грунтов основания в зависимости от принятого принципа использования этих грунтов и установление мероприятий, обеспечивающих соблюдение этого режима.

Таким образом, при расчете по предельным состояниям несущая способность основания и его ожидаемые деформации должны устанавливаться с учетом их температурного режима, а при принципе I – также и с учетом продолжительности действия нагрузок и реологических свойств грунтов, то есть изменения их свойств во времени.

Учет температурного режима основания осуществляется теплотехническим расчетом. При использовании грунтов основания по принципу I в результате таких расчетов определяется температура мерзлых грунтов, в зависимости от которой назначаются расчетные, прочностные и деформационные характеристики грунтов.

При использовании вечномерзлых грунтов по принципу I расчет оснований должен производиться:

- по несущей способности – для твердомерзлых грунтов;
- по несущей способности и по деформациям – для пластично мерзлых и сильнольдистых грунтов, а также подземных льдов.

Твердомерзлые грунты являются малосжимаемыми, и у них деформации объемного сжатия и деформации сдвиговой ползучести при напряжениях, не превышающих расчетные сопротивления, будут, как правило, незначительны.

Поэтому при нагрузках, меньших расчетных сопротивлений, осадки оснований, сложенных твердомерзлыми грунтами, как правило, не превысят предельно допускаемых значений. Соответственно расчет таких оснований по второй

группе предельных состояний можно не производить, ограничившись расчетом только по прочности (по несущей способности).

Пластично-мерзлые или сильнольдистые грунты, а также подземные льды обладают сильно выраженными вязкими свойствами и способны развивать большие деформации ползучести (включая деформации незатухающей ползучести). Кроме того, пластично-мерзлые или сильнольдистые грунты, а также подземные льды являются сжимаемыми и способны давать ощутимые осадки уплотнения. Поэтому основания, сложенные пластично-мерзлыми или сильнольдистыми грунтами, а также подземными льдами, рассчитываются по двум группам предельных состояний – по несущей способности и по деформациям.

Предельно длительное сопротивление мерзлых грунтов (кроме сильнольдистых и льда) рассматривается как нормативное сопротивление $R_{\infty} = R^H$.

Характерной особенностью мерзлых грунтов в силу своей криогенной текстуры является то, что даже при отрицательной температуре их механические свойства существенно зависят не только от гранулометрического состава и влажности, но и от их температуры. При оттаивании мерзлых грунтов происходит качественный скачок в их механическом поведении. Они дают значительную просадку в основаниях сооружений и приводят к потере устойчивости склонов и откосов, сложенных вечномерзлыми грунтами. Это обусловлено ослаблением цементирующих свойств замерзшей воды между частицами, что приводит к потере структуры и к большим объемным и сдвиговым деформациям.

По внешнему виду компрессионные кривые оттаивающих грунтов совпадают с компрессионными кривыми просадочных грунтов. Поэтому для описания механических свойств во многом можно воспользоваться аналогичными принципами построения механической модели оттаивающего грунта. Вместе с тем, очевидно, что процесс оттаивания мерзлых грунтов существенно отличается от процесса замачивания просадочных грунтов. Все эти особенности следует учитывать при прогнозировании НДС мерзлых и оттаивающих грунтов.

При оттаивании мерзлые и вечномерзлые грунты теряют свою прочность при сдвиге и претерпевают значительные объемные деформации из-за отжатая избыточной поровой воды, образовавшейся при оттаивании льда в межчастичном пространстве. Вследствие оттаивания мерзлого основания сооружения могут испытывать значительные и неравномерные осадки, а порой и те-

рять свою устойчивость. Драчков Д.С. в своей работе «Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах» пред-

ставил характерные зависимости ε - σ при компрессионном сжатии и τ - σ при плоском срезе мерзлого и оттаявшего грунтов (рис. 7).

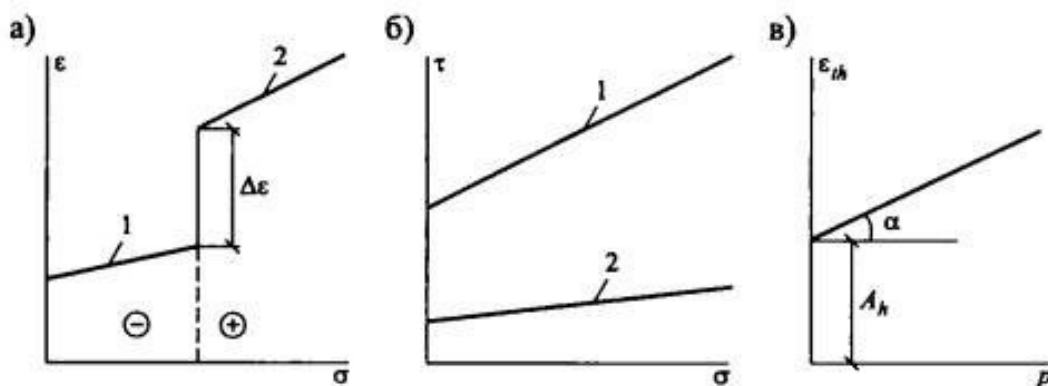


Рис. 7. А) зависимости ε - σ ; б) τ - σ ; в) ε_{th} - p мерзлого грунта до (1) и после (2) оттаивания

Из приведенных графиков следует, что относительная деформация оттаивающего грунта ε_{th} равна:

$$\varepsilon_{th} = (h_f - h_{th}) / h_f = A_{th} + \delta \cdot p,$$

где h_f и h_{th} – высота образца в мерзлом и талом состояниях соответственно, в условиях компрессионного сжатия, A_{th} и $\delta = \tan \alpha$ соответственно коэффициент оттаивания и сжимаемости.

Следовательно, осадка оттаявшего грунта состоит из осадки оттаивания, не зависящей от нагрузки и характеризуемой коэффициентами A_{th} и осадки уплотнения, развивающейся пропорционально приложенной нагрузке и характеризуемой коэффициентами δ .

При прогнозировании НДС оттаивающих оснований сооружений не следует все сводить к проблеме прогноза осадок оснований, обусловленных одномерным уплотнением. Наряду с этим в оттаивающем массиве грунтов под воздействием местной нагрузки развиваются значительные сдвиговые деформации, которые также приводят к просадкам. Карлов В.Д. в своей работе представил механизм изменения НДС мерзлого грунта при оттаивании в условиях сложного НДС следующим образом (рис. 8).

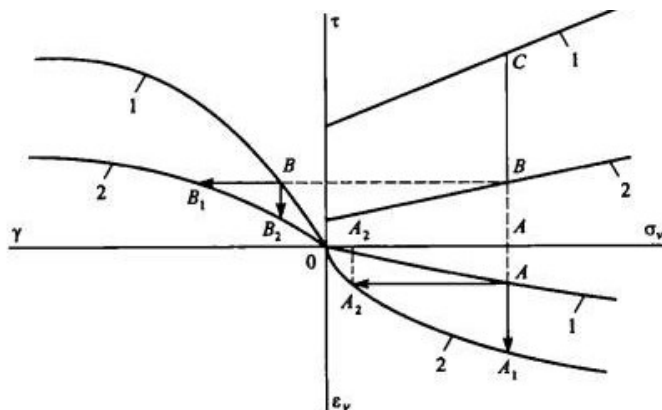


Рис. 8. К механизму изменения НДС мерзлого грунта при его оттаивании в условиях трехосного НДС при приращении температуры на $\Delta\theta$ в условиях свободной и фиксированной деформаций сдвига и объема:
1, 2 – кривые зависимости τ - γ , ε_v - σ_v и τ - σ в мерзлом и талом состояниях грунта соответственно

Предположим, что образец в мерзлом и оттаявшем состояниях в условиях трехосного сжатия подвергся нагружению по траектории ОАВС и ОАВ соответственно. Тогда получим кривые γ - τ и ε_v - σ_v соответственно для мерзлого и оттаявшего состояний.

Если в точке А при гидростатическом обжатии увеличить температуру до $t > 0^\circ\text{C}$, то получим

дополнительную объемную деформацию $A\varepsilon_v = AA_1$. Если же в точке А на кривой 1 зафиксировать объемные деформации и увеличить температуру, то получим отрицательное приращение сжимающих напряжений $\Delta\sigma_v = AA_2$. Если в точке В при девиаторном нагружении по кривой 1 зафиксировать напряжения и оттаивать грунт, то полу-

чим дополнительные сдвиговую $\Delta\gamma = BB1$ и объемную $\Delta\varepsilon_v = AA1$ деформации. Если же в точке В по кривой 1 зафиксировать деформации и оттаивать грунт, то получим снижение касательных $\Delta\tau = BB1$ и нормальных $\Delta\sigma_v = AA2$ напряжений).

Из приведенного здесь анализа НДС мерзлого грунта, при переходе его в талое состояние грунта, видно, что в отличных от условий компрессионного сжатия условиях трехосного НДС процесс деформирования протекает сложнее. Наряду с объемными деформациями при оттаивании мерзлого грунта развиваются значительные сдвиговые деформации, которые могут являться основной причиной больших и неравномерных осадок оснований сооружений. Поэтому при изучении механических свойств мерзлых и оттаивающих грунтов следует в обязательном порядке провести испытания на сдвиг и на срез мерзлых грунтов в оттаявшем состоянии.

Известно, что общая осадка на оттаивающем основании складывается из осадки S_p , обусловленной дополнительным давлением на грунты основания от фундамента, и осадки вызванной действием собственного веса S_{lh} , то есть

$$S = S_p + S_{lh}.$$

В настоящее время существует три основных метода расчета осадок фундаментов: метод линейно деформируемого слоя (метод проф. К.Е. Егорова), метод послойного суммирования и метод одномерного компрессионного сжатия (частный случай метода эквивалентного слоя проф. Н.А. Цытовича). Все вышеназванные методы расчета осадок основаны на линейной зависимости деформаций от напряжений. Принципиальные отличия этих методов расчета заключаются в учете природных напряжений грунтов от собственного веса, способе определения сжимаемой толщи грунтов и определении распределения напряжений по глубине от внешнего давления. В практике проектирования оснований и фундаментов наиболее распространенным и авторитетным считается метод послойного суммирования.

Осадка при оттаивании мерзлых грунтов очень важный показатель, который необходим при расчетах оснований и фундаментов по второму предельному состоянию (по деформациям). Особенно это необходимо, если рекомендуется вести строительство с оттаиванием многолетне-мерзлых грунтов в основании сооружений.

Для расчета величины относительного сжатия вечномерзлого грунта необходимо иметь такие показатели как коэффициент оттаивания A_{th} и коэффициент сжимаемости или уплотнения оттаивающего грунта δ_i .

Коэффициенты A_{th} и δ_i , характеризующие сжимаемость оттаивающего грунта, могут быть

определены горячими штампами в полевых условиях или методом компрессионных испытаний в лабораторных условиях. Допускается определять осадку при оттаивании расчетным методом.

Для определения первой и второй частей осадок используется традиционный метод элементарного послойного суммирования:

$$S = \sum_{i=1}^n [A_{th,i} + \delta_i(\sigma_{zp,i} + \sigma_{zg,i})] h_i,$$

где $A_{th,i}$, δ – соответственно коэффициенты оттаивания и сжимаемости i -ого слоя; $\sigma_{zp,i}$ и $\sigma_{zg,i}$ – вертикальные напряжения от действия внешней нагрузки и собственного веса соответственно.

При таком подходе к расчету осадки оттаивающего основания учитывается только один компонент напряжений σ_z и не учитывается возможность бокового расширения. Однако, очевидно, что осадка (просадка) оттаивающего грунта может произойти не столько из-за одномерного уплотнения, сколько сдвиговыми деформациями слабого водонасыщенного грунта, каким является мерзлый грунт сразу после оттаивания.

Поэтому наряду с традиционными методами определения осадок оттаивающего основания, основанного на компрессионных испытаниях, целесообразно использовать более прогрессивные методы, учитывающие свойства грунтов при уплотнении:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[A_{th,i} + \frac{\tau_{xz,i}}{2G_i} + \frac{\sigma_i}{K_i} \right] h_i,$$

где $\tau_{xz,i} = \sigma_{zp,i} = \sigma_i$, $\sigma_i = (\sigma_{xp,i} + \sigma_{yp,i} + \sigma_{zp,i})/3$, G_i и K_i – модули деформаций i -ого слоя оттаивающего грунта, которые на порядок меньше модулей деформации того же грунта в мерзлом состоянии.

Приведенные выше выражения определяют только лишь стабилизированную осадку, что необходимо для принятия конструктивных решений по проектированию зданий и сооружений, возводимых на мерзлых и оттаивающих основаниях (рис. 9).

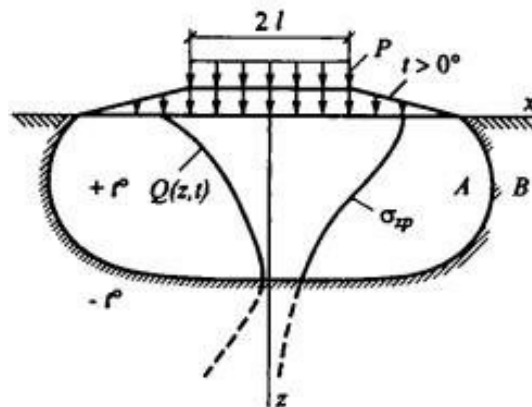


Рис. 9. Расчетная схема для определения НДС основания от действия местной нагрузки в процессе оттаивания

Нагрузки и воздействия на основания, передаваемые фундаментами зданий и сооружений или их отдельных элементов, устанавливаются в соответствии с СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». В дополнение к указаниям нагрузки на основания допускается определять без учета их перераспределения надфундаментной конструкцией и принимать в соответствии со статической схемой здания или сооружения при использовании вечномерзлых грунтов в качестве основания по принципу I, если эти грунты находятся в твердомерзлом состоянии.

Нагрузки, передаваемые на грунты основания, используемые по принципу II, определяются, как правило, расчетом из условия совместной работы здания (сооружения) и основания или фундамента и основания.

Твердомерзлые грунты (кроме сильнольдистых) рассматриваются как малосжимаемые, и потому при использовании основания по принципу I определение нагрузок производится без учета жесткости конструкций здания или сооружения.

Нагрузки на основания, которые рассчитываются по деформациям, как правило, определяются с учетом их перераспределения конструкциями здания (сооружения). Совместная работа здания (сооружения) и основания может не учитываться, когда ожидаемые деформации от

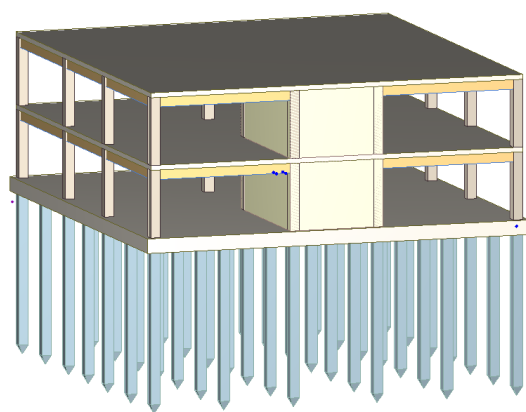


Рис. 10. Предлагаемая модель здания (общий вид)

В качестве варьируемых параметров предлагаются структура и состав грунтовых массивов, глубина заложения фундаментов и погонная жесткость стержневых элементов расчетной схемы надземной части здания.

Выводы.

1. Проведенный в статье обзор говорит о том, что большой опыт и эволюция методов стро-

нагрузок, определенных без учета жесткости конструкций, не превосходят предельные значения.

При учете совместной работы здания (сооружения) и основания или фундамента и основания, используемого по принципу II с допущением оттаивания грунтов в процессе эксплуатации, воздействие неравномерных деформаций основания, вызванных оттаиванием вечномерзлых грунтов, рассматривается как длительно действующее. При расчете конструкций здания (сооружения) по I-й группе предельных состояний усилия в них от этого воздействия рассчитываются с коэффициентом перегрузки $n=1$.

Моделирование НДС конструкций здания вследствие неравномерных деформаций основания, возникающих в процессе просадки и деградации мерзлоты, позволит решить актуальную задачу по оценке несущей способности и прогнозированию дальнейшей эксплуатационной пригодности. Для выполнения исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» планируется выполнить компьютерное моделирование в программе САПФИР. В качестве моделируемого объекта будет каркасное здание с традиционными конструктивными решениями, жесткость которого обеспечивается за счет соединения монолитного перекрытия с колоннами (рис. 10, 11). Расчет модели будет производиться в ЛИРА-САПР.

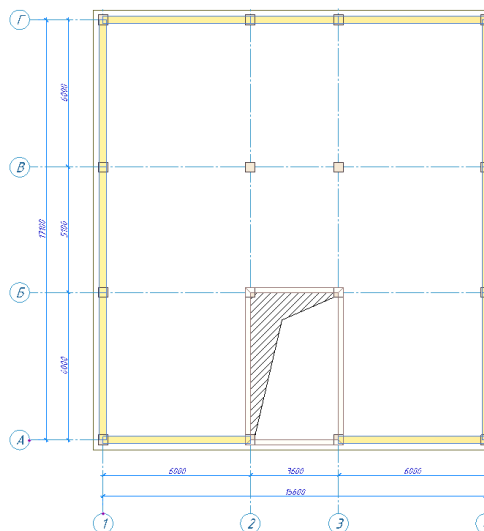


Рис. 11. Схема плана здания

ительства в условиях вечной мерзлоты на протяжении двадцатого века привела к возможности существенно расширить строительную деятельность в данных условиях. Однако следует обратить внимание на то, что возведение зданий с учетом условий вечной мерзлоты обладает рядом особенностей, которые включают специальные требования к проектированию, строительству и эксплуатации сооружений.

2. В виду большого количества выпадающего снега и значительных ветровых нагрузок, при их проектировании зданий предпочтение отдается геометрическим формам контуров зданий. В проектах стремятся к созданию минимальной боковой поверхности, контактирующей с морозным воздухом, при максимальном сохранении функционального назначения и основных технологических процессов здания.

3. Учеными и специалистами, занимающимися вопросами мерзлотоведения, совместно с архитекторами, строителями и технологами, разработаны два принципа устройства оснований с использованием многолетнемерзлых грунтов: I принцип – вечно мерзлое состояние грунта основания сохраняют в течение всего периода строительства и эксплуатации здания или сооружения; II принцип – вечномерзлые грунты оснований используют в оттаявшем состоянии с оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения или в процессе эксплуатации здания. Конкретный выбор делается при сопоставлении технико-экономических расчетов и эффективности рассматриваемых решений.

4. Требования современных строительных технологий ставят задачи совершенствования методов исследования многолетнемерзлых грунтов и разработке эффективных конструкций фундаментов, важнейшей целью которых более эффективно использовать потенциал несущей способности грунтов в УВМ с учетом перспективы климатических изменений. Рассмотренные конструктивные решения фундаментов, позволяют повысить эффективность использования потенциальной несущей способности мерзлых грунтов оснований. Наиболее перспективные из них – сваи с неровной боковой поверхностью (винтовые, с арматурными стержнями, приваренными к стволу сваи; рифленые).

5. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов здания при деформациях на мерзлых грунтах представляет собой сложную задачу, решить которую становится возможным с применением компьютерных программных комплексов. В связи с этим было принято решение выполнить расчетную модель в программном комплексе САПФИР с последующим расчетом в ЛИРА-САПР для анализа влияния взаимодействия грунтов и фундамента в различных грунтовых условиях на НДС каркаса здания.

6. По сей день главными вопросами в развитии данного направления остается изучение влияния отдельных процессов на строительство, в частности, можно выделить вопрос о влиянии грунтового основания и фундамента в УВМ на напряженно-деформированное состояние каркаса здания. Результаты планируемого исследования могут позволить оценить достоверность

выполняемых расчетов и определить необходимость учета ряда факторов при расчете каркаса. Данные также могут помочь в решении вопросов о повышении устойчивости, надежности и долговечности зданий, возводимых в условиях вечной мерзлоты, что приобретает большое практическое значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тазаян Ю. Строительство зданий и сооружений на вечной мерзлоте // Молодой ученый. 2020. № 48. С. 67–72.
2. Шикломанов Н.И., Стрелецкий Д.А., Гребенец В.И., Луис Сутер. Покорение вечной мерзлоты: развитие городской инфраструктуры в Норильске, Россия // Полярная география. 2017. С. 22–32.
3. Ким М.В. Фундаменты капитальных зданий на мерзлоте в Норильске. Красноярск: Красноярское книж. изд-во, 1960. 19 с.
4. Алёшина Т.А. Строительство на мерзлоте: опыт и новшества [Электронный ресурс] URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106.
5. Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) // Криосфера Земли. 2007. т. XI. №2. С. 78–83.
6. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. С. 62–75.
7. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С., Спасенникова К.А. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 3. С. 82–90.
8. Васьковский А.П., Шкляров Н.Д. Конструкции гражданских зданий для строительства на Севере. Л.: Стройиздат, 1979. 136 с.
9. Максимов Г.Н., Смирнов В.Д. К вопросу о возведении жилых зданий в районах распространения вечномерзлых грунтов без проветриваемых подполий // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств : сб. науч. тр. Якутск, 1983. С. 77–81.
10. Цуканов Н.А., Баев М.А., Бабух А.П., Поз Г.М. О некоторых характерных особенностях теплового взаимодействия между массивами вечномерзлых грунтов под отопляемыми зданиями и снаружи при различных условиях снегоотложения у фундаментов // Вестник Тюм-ГАСУ. 2015. № 4. С. 52–59.
11. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and

Geotechnics. 2021. Т. 12. № 3. С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

12. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Влияние преобразования грунтов криолитозоны на их температурное состояние в основании здания // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17

13. Рожкова К.В. Численное моделирование аэродинамики и теплового влияния на грунт здания с открытым подпольем при варьировании его размеров // V конференция «Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений», г. Томск. 2022. С. 14–24.

14. Грибовский Г.В., Кушнарёв А.Г. О проблеме оценки теплообмена грунта с воздухом с учетом воздействия солнечной радиации для теплотехнических расчетов инженерных сооружений на ММГ // VI конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», г. Москва. 2022. С. 113–121.

15. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150

16. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions. Geography, Environment, Sustainability Journal. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 104–119.

17. Плотников А.А. Макаров В.И. Методы охлаждения оснований зданий, построенных по принципу сохранения грунтов в мерзлом состоянии (на примере г. Мирного) // ОФМГ. 2017. №5. С. 26–31

18. Горелик Я.Б., Хабитов А.Х., Земеров И.В. Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых оснований с применением агрегата принудительной циркуляции хладагента // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 4. С. 36–46.

19. Абросимов А.И., Тепляков А.В., Залетаев С.В. Увеличение несущей способности свай путем установки в проветриваемое подполье охладителей грунта // Сб. докл. расширенного заседания Совета по криологии Земли. М., МГУ. 2018. Т. 2. С. 9–15.

20. Gao Q. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology. 2020. 178 p.

21. Горелик Я.Б., Земеров И.В. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. № 1. С. 10–40/ DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40.

22. Горелик Я.Б., Романюк С.Н., Хабитов А.Х. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2019. т. XXIII. № 2. С. 79–87.

23. Функ А.А. Строительство зданий и сооружений в экстремальных климатических условиях: особенности организации работ и используемых стройматериалов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. №4. С. 3–9. DOI: 10.15862/06SATS418.

24. Радостев А.Я., Валдаев Д.М. Особенности оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения вечномерзлых грунтов// Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 16–24.

25. Зуев С.С., Каменских Е.М., Маковецкий О.А. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-32-39

26. Кочерженко В.В. Инновационные свайные технологии в современном фундаментостроении // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 4. С. 57–67.

27. Драчков Д.С. Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Сб. ст. V междунар. науч.-практ. конф. Пенза. 2017. С. 133–135.

28. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Боцман Л.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №11. С. 36–42.

29. Кузнецова В.Н. Анализ результатов сжимаемости мерзлых грунтов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 7. С. 90–93.

30. Рекомендации по проектированию фундаментов мобильных (инвентарных) зданий на вечномерзлых грунтах. М.: Стройиздат, 1988. 112 с.

31. Трохалин А.А., Роговая А.П. Принципы и конструктивные решения по возведению фундаментов на вечномерзлых грунтах // Сборник научных трудов 3-й Всероссийской конференции. 2021. С. 258–260.

32. Набережный А.Д., Кузьмин Г.П., Посельский Ф.Ф. Анализ причин снижения несущей способности оснований и фундаментов в геокриологических условиях Якутии // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №8. С. 64–69.

33. Майструк А.Г., Пегин П.А. Анализ конструкции фундаментов, устраиваемых на вечномерзлых грунтах // Заметки ученого. 2021. №9. С. 31–35.

34. Губко Г.Л. Конструктивные и технологические решения фундаментов из лопастных

свай в многолетнемерзлых грунтах // Вестник науки и образования. 2018. №9. С 52–58.

35. Войтиковский К.Ф., Мельников П.И., Порхаев Г.В., Вотяков И.Н. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. М.: Наука, 1968. 198 с.

36. Саввина А.Е., Сыроватский А.А. Проблемы свайного фундаментостроения в Республике Саха (Якутия) // Архитектура и строительство: тез. докл. научн.-техн. конф. Томск. 1999. С. 45–47.

37. Гончаров Ю.М. Эффективный тип фундамента для строительства на многолетнемерзлых грунтах [Электронный ресурс]. URL: <http://imz-2000.narod.ru/ugnhtml>

38. Познаркова С.В., Зепалов Ф.Н. Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка // Труды IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Якутск. 2011. 44 с.

39. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов

зданий и оснований. СПб.: Издательство института «Георекострукция», 2014. 328 с.

40. Набережный А.Д. Анализ эффективности технологии обустройства фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов // В сб. Международной научно-технической конференции молодых ученых и исследователей. 2010. С. 15–19.

41. Афанасьева Ю.С. Исследование напряженно-деформированного состояния несущих конструкций монолитного железобетонного здания с учётом последовательности возведения // Молодой ученый. 2021. № 22. С. 83–90.

42. Андреев, В.И. Расчет модели системы конструкция – фундамент – основание с учетом деформаций сдвига // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6. С. 2–5.

43. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В., Шишкина К.М. Исследование напряженно-деформированного состояния основания и фундамента жилого здания на слабых промерзающих грунтах. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 98 с.

Информация об авторах

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.

Турков Андрей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов. E-mail: aturkov@bk.ru. Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. Россия, 302002, г. Орел, ул. Московская, д. 77.

Дьяченко Анастасия Юрьевна, магистрант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: dyachenko.anastasya28n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Есипова Диана Васильевна, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: dianagridiakina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.10.2023 г.

© Есипов С.М., Турков А.В., Дьяченко А.Ю., Есипова Д.В., 2023

^{1,*}*Esipov S.M.*, ²*Turkov A.V.*, ¹*Diachenko A. Yu.*, ¹*Esipova D.V.*

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

²*Oryol State University named after I.S. Turgenev*

^{*}*E-mail: sk31.sm@gmail.com*

THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FOUNDATION IN PERMAFROST CONDITIONS AND ITS EFFECT ON THE FORCES IN THE ELEMENTS OF THE ABOVEGROUND PART OF THE BUILDING

Abstract. The article considers examples of space-planning and structural solutions of frame buildings during construction in permafrost regions. The most typical schemes and methods of solving problems related to compensation of deformations during cyclic freezing and thawing, temperature influence on the condition of foundations, as well as the compilation of design schemes of foundations and aboveground structures, taking into account the factors of actual operation, are analyzed. The problems of assessing the technical condition of foundations and compiling mathematical models for calculating structures by the finite element method in permafrost conditions are highlighted. A program of numerical experimental studies has been developed that allows obtaining the desired dependencies of the stress-strain state and creating a computational model that adequately corresponds to the actual operation of structures in permafrost. The following are the matrices

developed by the authors of varied factors, on the basis of which calculation it is possible to take into account additional factors arising in the structures when the homogeneity of the frozen base is violated. Prerequisites are given for drawing up the most correct calculation scheme for controlling the behavior of foundations on frozen soils. A method of taking into account the possible temperature precipitation of the base on the distribution of internal force factors in the above fundament structure is proposed.

Keywords: permafrost, frame system, stress-strain state, sediment, foundations.

REFERENCES

1. Tazayan Yu. Construction of buildings and structures on permafrost [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij na vechnoj merzlote]. Molodoj uchenyj. 2020. No. 48. Pp. 67–72. (rus)
2. Shiklomanov N.I., Streleckij D.A., Grebenec V.I., Luis Suter. Conquering Permafrost: Urban Infrastructure Development in Norilsk, Russia [Pokorenie vechnoj merzloty: razvitie gorodskoj infrastruktury v Noril'ske, Rossiya]. Polyarnaya geografiya. 2017. Pp. 22–32. (rus)
3. Kim M.V. Foundations of capital buildings on permafrost in Norilsk [Fundamenty kapital'nyh zdaniy na merzlote v Noril'ske]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk book publishing house, 1960. 19 p. (rus)
4. Alyoshina T.A. Building on permafrost: experience and innovations [Stroitel'stvo na merzlote: opyt i novshestva]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106.
5. Alekseeva O.I., Balobaev V.T., Grigor'ev M. N., Makarov V.N., CHzhan R.V., SHac M.M., SHepelev V.V. On the problems of urban development in cryolithozone (on the example of Yakutsk) [O problemah gradostroitel'stva v kriolitozone (na primere YAkutsk)]. Kriosfera Zemli. 2007. Vol. XI. No2. Pp. 78–83. (rus)
6. Ohlopko T.V., Gur'yanov G.R., Plotnikov A.A. Construction and design of buildings and structures in permafrost conditions [Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vechnoj merzloty]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. No4. Pp. 62–75. (rus)
7. Mel'nikov V.P., Mel'nikova A.A., Anikin G.V., Ivanov K.S., Spasennikova K.A. Engineering solutions in permafrost construction in terms of improving energy efficiency of structures [Inzhenernye resheniya v stroitel'stve na vechnoj merzlote v plane povysheniya energoeffektivnosti sooruzhenij]. Kriosfera Zemli. 2014. Vol. 18. No 3. Pp. 82–90. (rus)
8. Vas'kovskij A.P., Shklyarov N.D. Structures of Civil Buildings for Construction in the North [Konstrukcii grazhdanskikh zdaniy dlya stroitel'stva na Severe]. L.: Strojizdat, 1979. 136 p. (rus)
9. Maksimov G.N., Smirnov V.D. To the question of erection of residential buildings in areas of permafrost soils without ventilated subfields [K voprosu o vozvedenii zhilyh zdaniy v rajonah rasprostraneniya vechnomerzlyh gruntov bez provetrivayemyh podpolij]. Regulation of foundation soil temperature by means of seasonally acting cooling devices: Collection of scientific works Yakutsk, 1983. Pp. 77–81. (rus)
10. Cukanov N.A., Baev M.A., Babuh A.P., Poz G.M. On some characteristic features of thermal interaction between permafrost soil masses under heated buildings and outside under different conditions of snow deposition at foundations [O nekotoryh harakternyh osobennostyakh teplovogo vzaimodejstviya mezhdu massivami vechnomerzlyh gruntov pod otaplivaemymi zdaniyami i snaruzhi pri razlichnyh usloviyah snegootlozheniya u fundamentov]. Bulletin of Tyum GASU. 2015. No 4. Pp. 52–59. (rus)
11. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Bearing capacity of piles in permafrost soils under climate change [Nesushchaya sposobnost' svaj v mnogoletnemerzlyh gruntah pri izmenenii klimata]. Construction and Geotechnics. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02 (rus)
12. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Effect of transformation of cryolithozone soils on their temperature state at the base of the building [Vliyanie preobrazovaniya gruntov kriolitozony na ih temperaturnoe sostoyanie v osnovanii zdaniya]. Residential construction. 2022. No 9. Pp. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17 (rus)
13. Rozhkova K.V. Numerical modeling of aerodynamics and thermal influence on the ground of a building with an open cellar at varying its dimensions [Chislennoe modelirovanie aerodinamiki i teplovogo vliyaniya na grunt zdaniya s otkrytym podpol'em pri var'irovanii ego razmerov]. V Conference "Technologies of Oil, Gas and Gas Condensate Fields Development", Tomsk. 2022. Pp. 14–24. (rus)
14. Gribovskij G.V., Kushnaryov A.G. On the problem of estimation of soil-air heat exchange taking into account the impact of solar radiation for thermal engineering calculations of engineering structures on permafrost soils [O probleme ocenki teploobmena grunta s vozduhom s uchetom vozdejstviya solnechnoj radiacii dlya teplotekhnicheskikh raschetov inzhenernyh sooruzhenij na MMG]. VI Conference of Geocryologists of Russia "Monitoring in Cryolithozone", Moscow. 2022. Pp. 113–121. (rus)
15. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150
16. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar

Regions. Geography, Environment, Sustainability Journal. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 104–119.

17. Plotnikov A.A., Makarov V.I. Methods of cooling the bases of buildings constructed on the principle of preservation of soils in the frozen state (on the example of Mirny) [Metody ohlazhdeniya osnovanij zdaniy, postroennyh po principu sohraneniya gruntov v merzлом sostoyanii (na primere g. Mirnogo)]. OFMG. 2017. No. 5. Pp. 26–31. (rus)

18. Gorelik Ya.B., Habitov A.H., Zemerov I.V. Efficiency of surface cooling of frozen bases using forced refrigerant circulation unit [Effektivnost' poverhnostnogo ohlazhdeniya merzlyh osnovanij s primeneniem agregata prinuditel'noj cirkulyacii hladagenta]. Earth's cryosphere. 2021. Vol. XXV. No 4. Pp. 36–46. (rus)

19. Abrosimov A.I., Teplyakov A.V., Zaletaev S.V. Increasing the bearing capacity of piles by installing soil coolers in a ventilated sub-floor [Uvelichenie nesushchej sposobnosti svaj putem ustanovki v provetrivaemoe podpol'e ohladitelej grunta]. Proceedings of the Extended Meeting of the Council on Earth Cryology. MOSCOW, MSU. 2018. Vol. 2. Pp. 9–15. (rus)

20. Gao Q. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology. 2020. 178 p.

21. Gorelik Ya.B., Zemerov I.V. Influence of surface watering on the temperature regime of frozen soils [Vliyanie poverhnostnogo obvodneniya na temperaturnyj rezhim merzlyh gruntov]. Vestn. Tyum. gos. un-sta. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, power engineering. 2020. No 1. Pp. 10–40. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40. (rus)

22. Gorelik Ya.B., Romanyuk S.N., Habitov A.H. Taking into account the joint thermal effect of wells in a cluster when calculating the parameters of the permafrost thawing area [Uchet sovместного teplovogo dejstviya skvazhin v kuste pri raschete parametrov oblasti protaivaniya merzlyh gruntov]. Earth's Cryosphere. 2019. Vol. XXIII. No 2. Pp. 79–87. (rus)

23. Funk A.A. Construction of buildings and structures in extreme climatic conditions: peculiarities of work organization and used construction materials [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij v ekstremal'nyh klimaticheskikh usloviyah: osobennosti organizacii rabot i ispol'zuemyh strojmaterialov]. Internet journal "Transport Structures". 2018. No. 4. Pp. 3–9. DOI: 10.15862/06SATS418 (rus)

24. Radostev A.YA., Valdaev D.M. Peculiarities of bases and foundations of buildings and structures erected on the territory of permafrost soils distribution [Osobennosti osnovanij i fundamentov zdaniy i sooruzhenij, vozvodimyh na territorii rasprostraneniya vechnomerzlyh gruntov]. Modern technologies in construction. Theory and practice. 2018. Vol. 2. Pp. 16–24. (rus)

25. Zuev S.S., Kamenskih E.M., Makoveckij O.A. On the possibility of applying the technology of jet grouting of soil in the zone of permafrost soils [O vozmozhnosti primeneniya tekhnologii strujnoj cementacii grunta v zone mnogoletnemerzlyh gruntov]. Residential construction. 2022. No 9. Pp. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-32-39 (rus)

26. Kocherzhenko V.V. Innovative pile technologies in modern foundation construction [Innovacionnye svajnye tekhnologii v sovremennom fundamentostroenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No 4. Pp. 57–67. (rus)

27. Drachkov D.S. Peculiarities of construction of buildings and structures on permafrost soils [Osobennosti stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij na mnogoletnemerzlyh gruntah]. Collection of articles. V International Scientific and Practical Conf. Penza. 2017. Pp. 133–135. (rus)

28. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Bocman L.N. Composite binder for monolithic construction in northern regions [Kompozicionnoe vyazhushchee dlya monolitnogo stroitel'stva v severnyh regionah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 36–42. (rus)

29. Kuznecova V. N. Analysis of the results of compressibility of frozen soils [Analiz rezul'tatov szhimaemosti merzlyh gruntov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 90–93. (rus)

30. Recommendations for designing foundations of mobile (inventory) buildings on permafrost soils [Recommendations for designing foundations of mobile (inventory) buildings on permafrost soils] M.: Stroyizdat, 1988. 112 p. (rus)

31. Trohalin A.A., Rogovaya A.P. Principles and design solutions for the construction of foundations on permafrost soils [Principy i konstruktivnye resheniya po vozvedeniyu fundamentov na vechnomerzlyh gruntah]. Collection of scientific papers of the 3rd All-Russian Conference. 2021. Pp. 258–260. (rus)

32. Naberezhnyj A.D., Kuz'min G.P., Posel'skij F.F. Analysis of the causes of reduction of bearing capacity of foundations in geocryological conditions of Yakutia [Analiz prichin snizheniya nesushchej sposobnosti osnovanij i fundamentov v geokriologicheskikh usloviyah Yakutii]. Industrial and civil engineering. 2016. No. 8. Pp. 64–69. (rus)

33. Majstruk A.G., Pegin P.A. Analysis of the design of foundations constructed on permafrost soils [Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivayemyh na vechnomerzlyh gruntah]. Scientist's Notes. 2021. No. 9. Pp. 31–35. (rus)

34. Gubko G.L. Structural and technological solutions for foundations made of pile piles in permafrost soils [Konstruktivnye i tekhnologicheskie resh-

eniya fundamentov iz lopastnykh svaj v mnogoletnemerzlykh gruntah]. Bulletin of Science and Education. 2018. No. 9. Pp. 52–58. (rus)

35. Vojtikovskij K.F., Mel'nikov P.I., Porhaev G.V., Votyakov I.N. Foundations of structures on frozen soils in Yakutia [Fundamenty sooruzhenij na merzlykh gruntah v Yakutii]. M.: Nauka, 1968. 198 p. (rus)

36. Savvina A.E., Syrovatskij A.A. Problems of pile foundation construction in the Republic of Sakha (Yakutia) [Problemy svajnogo fundamentostroeniya v Respublike Saha (Yakutiya)]. Architecture and Construction: abstracts of scientific and technical conf. Tomsk. 1999. Pp. 45–47. (rus)

37. Goncharov YU.M. Effective foundation type for construction on permafrost soils [Effektivnyj tip fundamenta dlya stroitel'stva na mnogoletnemerzlykh gruntah]. URL: <http://imz-2000.narod.ru/ygnhtml>

38. Poznarkova S.V., Zepalov F.N. Evaluation of 20-year operation of the foundation-shell in Igarka city [Ocenka 20-letnej ekspluatatsii fundamenta-obolochki v g. Igarka]. Proceedings of the IX International Symposium on Problems of Engineering Permafrost Science. Yakutsk. 2011. 44 p. (rus)

39. Ulickij V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Fundamentals of joint calculations of buildings and foundations [Osnovy sovmestnykh raschetov zdaniy i osnovanij]. Spb.: Publishing house of the Institute "Georeconstruction", 2014. 328 p. (rus)

Information about the authors

Esipov, Stanislav M. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Builders and Horoscopes. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Turkov, Andrey V. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures and Materials. E-mail: aturkov@bk.ru. Oryol National University named after I.S. Turgenev. Russia, 302002, Orel, Moskovskaya str., 77.

Dachenko, Anastasia Yu. Master's student of the departments of Builder and the city government. E-mail: dyachenko.anastasya28n@yandex.ru. Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Esipova, Diana V. Postgraduate student of the Department of Builder and Urban Education. E-mail: dianagridiakina@mail.ru. Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 23.10.2023

Для цитирования:

Есипов С.М., Турков А.В., Дьяченко А.Ю., Есипова Д.В. Напряженно-деформированное состояние фундамента в условиях вечной мерзлоты и его влияние на усилия в элементах надземной части здания // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 16–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31

For citation:

Esipov S.M., Turkov A.V., Diachenko A.Yu., Esipova D.V. The stress-strain state of the foundation in permafrost conditions and its effect on the forces in the elements of the aboveground part of the building. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 16–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31

40. Naberezhnyj A.D. Analyzing the efficiency of foundation construction technology in permafrost conditions [Analiz effektivnosti tekhnologii obustroystva fundamentov v usloviyakh mnogoletnemerzlykh gruntov]. In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Researchers. 2010. Pp. 15–19. (rus)

41. Afanas'eva Yu.S. Investigation of stress-strain state of bearing structures of monolithic reinforced concrete building taking into account the sequence of erection [Issledovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya nesushchih konstrukcij monolitnogo zhelezobonnogo zdaniya s uchyotom posledovatel'nosti vozvedeniya]. Young Scientist. 2021. No 22. Pp. 83–90. (rus)

42. Andreev V.I. Calculation of the structure-foundation-basement system model with consideration of shear deformations [Raschet modeli sistemy konstrukciya – fundament – osnovanie s uchetom deformatsij sdviga]. Structural mechanics and structural design. 2010. No. 6. Pp. 2–5. (rus)

43. Kudryavcev S.A., Kazharskij A.V., Shishkina K.M. Investigation of stress-strain state of foundation and foundation of residential building on weak freezing soils [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya i fundamenta zhilogo zdaniya na slabyyh promerzayushchih gruntah]. Khabarovsk: Izd. of DVGUPS, 2008. 98 p. (rus)

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-32-40

¹Сулейманова Л.А., ^{1,*}Обайди А.А.Х., ¹Амелин П.А., ²Мохаммедали Т.Х.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Университет Дияла, отдел строительства и проектов

*E-mail: Adkhem@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕМЫЧЕК ГАЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ

Аннотация. В данной работе авторами исследуется напряженно-деформированное состояние составных перемычек из газобетонных блоков со стержнями из стальной арматуры и внешним композитным армированием при работе на изгиб. Стержневое армирование перемычек осуществляется за счет врезки стальных арматурных стержней в тело газобетона в продольном и поперечном направлении. Композитное армирование выполняется лентами из углеродных волокон в растянутой грани элемента на всю ширину, а также частями лент на ложковых сторонах газобетонного блока в месте вертикального шва или в центре элемента. Результаты испытаний оценивались путем сравнения прочности нормального сечения и деформативности газобетонных изгибаемых перемычек, эффективности склеивания лент из углеродных волокон и газобетона и оптимальности использования различных типов армирования. Установлено, что внешнее композитное армирование при нагрузке до 60 % от разрушающей уменьшает деформативность газобетонных изгибаемых элементов вследствие увеличения изгибной жесткости, а при нагрузке более 60 % вследствие изменения расчетной схемы. Перемычки со стержневым армированием имеют хрупкий характер разрушения, а имеющие внешнее композитное армирование разрушаются пластично. В целом, несущая способность составных газобетонных перемычек, армированных внешним композитным армированием достаточна для восприятия эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: газобетонные блоки, составная перемычка, внешнее композитное армирование, прочность, деформативность, углеродные волокна.

Введение. Современное строительство и проектирование зданий и сооружений предъявляют высокие требования к прочности и долговечности строительных конструкций [1]. Одним из важных аспектов в данном контексте является разработка и оптимизация составных элементов, таких как перемычки, которые используются для поддержания оконных и дверных пролетов в зданиях и сооружениях.

Использование газобетона как строительного материала имеет ряд преимуществ, включая легкость, теплоизоляционные свойства, обеспечиваемые однородной пористой структурой [2, 3]. Однако, для обеспечения необходимой прочности и устойчивости при изгибе, газобетонные перемычки требуют армирования. В данной статье авторами проведено исследование напряженно-деформированного состояния составных перемычек из газобетонных блоков со стержнями из стальной арматуры и внешним композитным армированием при работе на изгиб.

Стальная арматура используется для стержневого армирования при врезке в тело газобетона как в продольном, так и в поперечном направлении, что позволяет увеличить прочность и жесткость перемычек, что снижает деформативность при изгибе [4–8].

Внешнее композитное армирование выполняется лентами из углеродных волокон, которые

накладываются на газобетонный блок в растянутой грани элемента на всю его ширину, а также в местах вертикальных швов или в центре элемента [9]. Данный тип армирования также способствует увеличению прочности и жесткости перемычек, что может уменьшить деформативность [10–13].

Целями настоящего исследования являются:

- анализ напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из газобетонных блоков, усиленных внешним полосовым армированием;

- оценка эффективности внешнего композитного усиления для его использования в изгибаемых конструкциях из газобетонных элементов;

- оценка эффективности применения изгибаемых составных перемычек из газобетонных блоков, при двух- и четырехточечном изгибе.

Материалы и методы. Составная ячеистобетонная перемычка состоит из двух газобетонных блоков и шва, скрепляющего блоки по торцевым сторонам. Также составная газобетонная перемычка снабжена стержневым армированием, выполненным в виде стальной арматуры, уложенной в штрабы в нижней стороне блоков, и внешним полосовым армированием, выполненным в виде ленты из углеродных волокон, жестко прикрепленной эпоксидным клеем с нижней стороны составной газобетонной перемычки по всей

ширине и длине с направлением волокон параллельно продольной оси перемычки, и частей лент, жестко прикрепленных к ложковым сторонам блоков в местах вертикальных швов, выполненных на полиуретановом клее, по всей высоте блока симметрично относительно вертикального шва [9].

В исследовании использовались газобетонные блоки с маркой по средней плотности $D500$ и классом по прочности $B3,5$. В качестве заполнителя шва применялся клеевой состав для газобетонных блоков с пределом текучести при растяжении $0,9$ МПа. В качестве стержневого армирования применялись стальные стержни $A400$ с модулем упругости 200000 МПа; пределом текучести при растяжении 320 МПа и предельной прочностью на растяжении 618 МПа при минимальном коэффициенте армирования μ_{min} (при $d = 8$ мм), пределом текучести при растяжении 512

МПа и предельной прочностью на растяжении 750 МПа при максимальном коэффициенте армирования μ_{max} (при $d = 10$ мм).

Однонаправленные ленты из углеродных волокон с модулем упругости 230000 МПа, предельной деформацией растяжения $0,3$ и толщиной $1,29$ мм, работающие на изгиб, ориентированы вдоль растянутой грани элемента, а поперечные ленты, работающие на сдвиг, ориентированы на 90° относительно продольной оси перемычки. Ленты из углеродных волокон прикрепляются к газобетонным блокам при помощи эпоксидного клея с модулем упругости 3800 МПа и прочностью на растяжение при изгибе 30 МПа.

В рамках исследования было изготовлено 20 образцов, которые были разделены на две серии (ГП-1 и ГП-2) в зависимости от типа нагрузки и армирования (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Схемы армирования перемычек с двухточечной нагрузкой для серии ГП-1

Наим-е образца	Поперечное сечение	Изометрический вид перемычек	Типы армирования
КП1			А: без армирования
П1			А: без армирования
П1-1			Б: армирование лентами на изгиб только с нижней поверхности
П1-1.1			В: стержневое армирование
П1-2			Г: армирование лентами в растянутой зоне и в зоне соединения блоков
П1-3			Д: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) и армирование швов с (μ_{min})
П1-4			Е: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне с (μ_{min})
П1-5			Д: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне и в зоне соединения блоков с (μ_{max})
П1-6			Е: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне с (μ_{max})

Первая группа перемычек (серия ГП-1) (табл. 1) предназначена для испытания на двухточечный изгиб (сосредоточенная нагрузка), вторая группа (серия ГП-2) (табл. 2) – на четырехточечный изгиб. Образцы армированы лентами из углеродных волокон в разных положениях и арматурными стержнями с целью исследования

прочности на растяжение и сдвиг. Все образцы имеют размеры поперечного сечения $1200 \times 240 \times 200$ мм. В качестве внешнего полосового армирования в исследовании использовались ленты из углеродных волокон Sikawrap 230C.

Таблица 2

Схемы армирования перемычек с четырехточечной нагрузкой для серии ГП-2

Наим-е образца	Поперечное сечение	Изометрический вид перемычек	Типы армирования
КП2			А: без армирования
П2			А: без армирования
П2-1			Б: армирование лентами на изгиб только в растянутой зоне
П2-1.1			В: стержневое армирование
П2-2			Г: армирование лентами в растянутой зоне и в зоне соединения блоков
П2-3			Е: армирование лентами в растянутой зоне, U-образная обертка усиления на сдвиг на каждом конце и армирование швов в середине
П2-4			Ж: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне и в зоне соединения блоков, U-образная обертка с хомутом
П2-5			И: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне и U-образная обертка с хомутом
П2-6			Ж: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне и в зоне соединения блоков, U-образная обертка с хомутом
П2-7			И: комбинированное армирование (ленты + стержневое армирование) в растянутой зоне и U-образная обертка с хомутом
П2-8			К: стержневое армирование, на изгиб и сдвиг

Для армирования перемычек стальными стержнями были выполнены штрабы в продольном направлении перемычек и по вертикали по схеме Fib TG 9.3 [14, 15], максимальном коэффициенте армирования μ_{max} : $h_g = 40$ мм, $b_g = 30$ мм,

$a_c = 40$ мм и $a'_c = 55$ мм, а минимальном коэффициенте армирования μ_{min} : $h_g = 32$ мм, $b_g = 24$ мм, $a_c = 40$ мм и $a'_c = 52$ мм. Система армирования стальными стержнями представлена на рисунке 1.

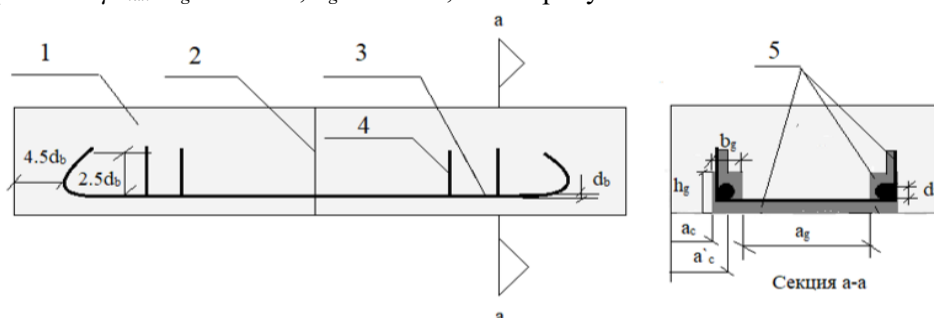


Рис. 1. Система армирования поверхности стальным стержнем с анкерной арматурой:
1 – газобетонное основание; 2 – вертикальный шов; 3 – продольный стержень ($d = 10$ мм);
4 – вертикальная арматура ($d = 8$ мм); 5 – штрабы

Все образцы были испытаны в соответствии с DIN EN 846-9-2016 «Определение прочности на изгиб и на срез перемычек» на четырехточечный изгиб. Схема и установка для испытаний составных перемычек для четырехточечного нагружения представлена на рисунке 2.

Нагрузка прикладывалась с использованием универсальной гидравлической машины мощностью 2000 кН. Скорость нагрузки была принята 1,5 мм/мин от смещения середины пролета в соответствии с EN 846-9-2016. Система сбора данных непрерывно записывала приложенные значения нагрузки и смещения в цифровом виде.



Рис. 2. Система загрузки: а – схема испытаний перемычек; б – установка для испытаний:
 L – длина балки; L_n – длина пролета в свету; a – пролет сдвига

Основная часть. Испытания образцов перемычек были проведены в соответствии с установленной методикой испытаний. Анализ результатов испытаний (табл. 3) позволил сделать выводы

о влиянии внешнего армирования на напряженно-деформированное состояние газобетонных изгибаемых конструкций, оценить характер разрушения.

Таблица 3

Значения предельных изгибающих нагрузок, напряжений и деформаций при испытаниях образцов

Се- рия	Наим-е об- разца	Нагрузка R_{max} , кН	Прогиб f_{max} , мм	Напряже- ния σ_{max} , кН/м ²	Относительная де- формация ε_{max} , %	Характер разрушения
ГП-1	КП1	5,3	0,004	72,9	0,282	хрупкое разрушение под действием силы сдвига в середине пролета
	П1	5,3	0,02	72,8	0,46	разрушение кладочного шва
	П1-1	16,5	3,44	226,9	3,3	разрушение при сдвиге
	П1-1,1	17,8	6,87	244,8	1,73–4,16	разрушение кладочного шва
	П1-2	21,5	2,96	295,6	1,86	разрушение при сдвиге
	П1-3	27,2	0,12	374,2	0,28–3,9	разрушение при сдвиге
	П1-4	25,2	0,16	347,3	0,5–1,3	разрушение при сдвиге
	П1-5	31,4	6,72	432,4	0,26–5	по нормальным сечениям в зоне чистого изгиба
ГП-2	П1-6	26,3	4,57	362	0,42–3,3	разрушение при сдвиге
	КП2	8,8	1,54	88	0,24	хрупкое разрушение под действием силы сдвига в середине пролета
	П2	1,7	3,81	17	0,14	разрушение кладочного шва
	П2-1	25	4,00	250	2,3	разрушение при сдвиге в опоре
	П2-1,1	20,9	5,43	209	0,42–2,2	разрушение при изгибе
	П2-2	22,9	3,53	229	1,4	разрушение при сдвиге в опоре
	П2-3	33,8	2,95	338	2,52	разрушение на изгиб с разрывом в зоне сдвига
	П2-4	65,1	51,42	651	0,23–1,63	разрушение на изгиб с разрывом в зоне сдвига
	П2-5	69,6	22,60	696	0,63–0,27	разрушение при изгибе и сдвиге в опоре
	П2-6	74,6	43,10	746	0,83–1,58	разрушение при изгибе и разрыв композитного листа в опоре
	П2-7	62,7	44,15	627	0,63–1,42	разрушение при изгибе и разрыв композитного листа в опоре
	П2-8	13,3	6,08	133	0,21–1,15	разрушение при изгибе

На основании показаний тензорезисторов и индикаторов часового типа определены величины продольных деформаций по высоте сечения образцов на отдельных этапах нагружений. Величины продольных деформаций как в сжатой зоне, так и в растянутой на противоположных боковых гранях образцов имели разницу не более 5 %, что свидетельствует о симметричном распределении изгибающего момента в поперечном сечении. На этапах, предшествующих разрушению образцов некоторые из тензорезисторов были выведены из строя вследствие их разрыва, после чего регистрация их показаний была остановлена. Диаграммы продольных деформаций

газобетонных изгибаемых перемычек по высоте сечения образца показаны на рисунке 3.

Анализируя диаграммы, представленные на рисунке 3, можно судить о характере распределения продольных деформаций по высоте сечения как о близком к линейному для всех образцов всех серий.

По данным тензорезисторов, установленных на ленте из углеродного волокна для образцов П2-4, и П1-3, построены диаграммы распределения относительных деформаций композита по его длине вдоль образца, представленные на рисунке 4.

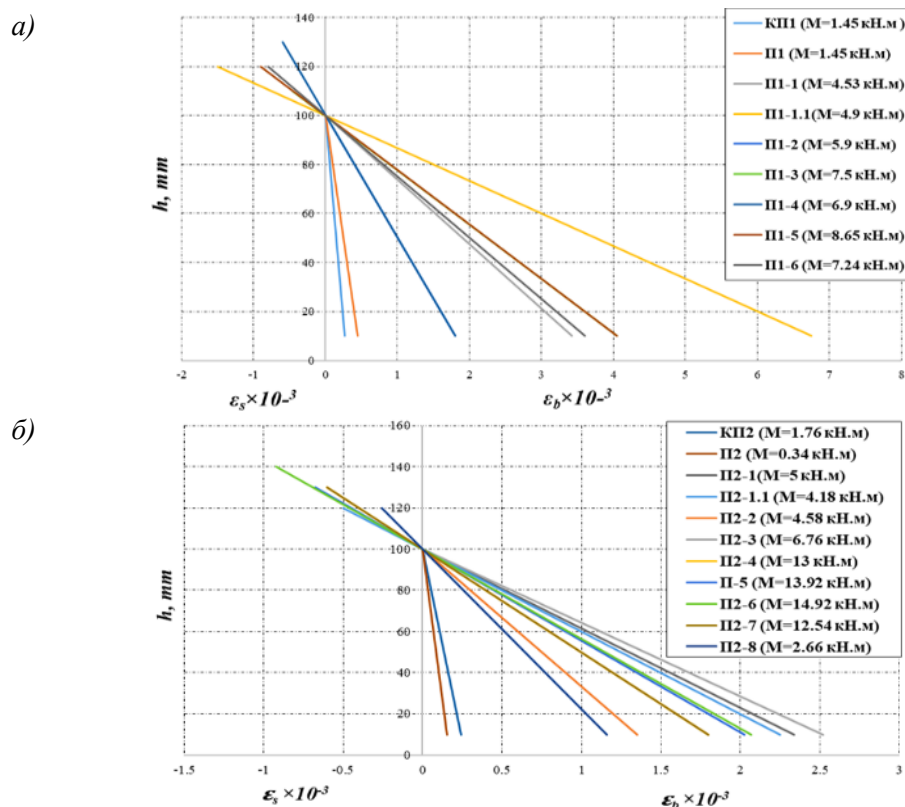


Рис. 3. Диаграмма напряжений и деформаций газобетонных перемычек: а – серии ГП-1; б – серии ГП-2

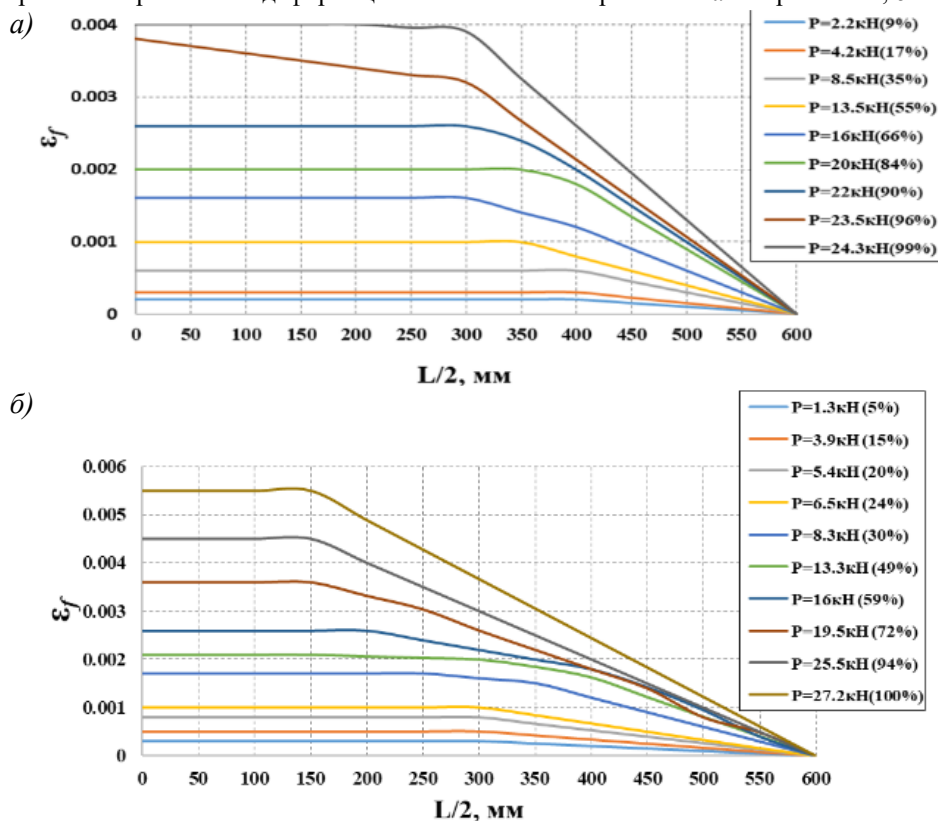


Рис. 4. Диаграмма распределения относительных деформаций углеродного волокна по длине анкеровки: а – на образце ГП1-3; б – на образце ГП2-4

Диаграмма на рисунке 4, б свидетельствуют о затухающем характере распределения деформаций ε_f элемента армирования по длине образца. До достижения $\varepsilon_f \approx 0,26\%$ относительные деформации распределяются между точками, соответствующими $L = 0-50$ мм и $L = 300$ мм довольно

равномерно после превышения указанной величины, деформации при $L = 300$ мм начинают отставать от максимальных значений. Изменение ε_f в интервале $L = 300-600$ мм линейно в соответствии с линейным уменьшением изгибающего момента в сечениях (рис. 4, а).

В большинстве армированных образцов в ходе испытаний зарегистрировано образование

нормальных трещин. Момент образования нормальных трещин определяли визуально, его значения приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сдвиговые усилия и моменты трещинообразования при испытании образцов серии ГП-2

Маркировка образца	V_{crc} , кН	V_{ulti} , кН	V_{ulti}/V_{crc}	$M_{crc}^{теор}$, кН,м	$M_{crc}^{эксп}$, кН,м	$\frac{M_{crc}^{эксп}}{M_{разр}^{эксп}}$
П2-1	24	12,5	0,52	5,9	4,8	0,96
П2-1.1	17,5	10,45	0,59	4,34	3,5	0,83
П2-2	22	11,45	0,52	5,45	4,4	0,96
П2-3	20,5	16,9	0,82	5,08	4,1	0,60
П2-4	55	32,55	0,59	13,64	11	0,85
П2-5	41	34,8	0,84	10,16	8,2	0,63
П2-6	47,5	37,3	0,78	11,78	9,5	0,63
П2-7	41	31,35	0,76	10,16	8,2	0,65
П2-8	12	6,65	0,55	2,97	2,4	0,90

Согласно полученным данным, образование трещин началось при изгибающем моменте, равном 25 % от разрушающего момента в перемычках серии ГП-2. Характер разрушения и образования трещин во всех образцах перемычек принципиально зависят от отношения предельного усилия сдвига к усилию сдвига трещины (V_{ulti}/V_{crc}). При V_{ulti}/V_{crc} равном нулю, как в КП2 и П2, имеется внезапное хрупкое разрушение под точечной нагрузкой. При этом если отношение больше 0,5, как и в других составных перемычках из газобетона, мы имеем диагональное хрупкое разрушение. С увеличением отношения V_{ulti}/V_{crc} наблюдается более стабильный процесс разрушения.

Выводы. В зависимости от результатов, полученных в ходе проведенного исследования, о поведении газобетонных перемычек, изготовленных с внешним полосовым армированием, при двух- и четырехточечной нагрузке можно сделать следующие выводы:

Установлены особенности напряженно-деформированного состояния образцов. Разрушение армированных перемычек произошло в результате разрушения основного газобетонного элемента при увеличении нагрузки. Степень повышения несущей способности нормальных сечений зависит от вида и положения армирования в серии ГП-1 (П1 и П1-1), ГП-2 (П2 и П2-1), средняя несущая способность увеличилась в семь раз после армирования по типу Б (армирование на изгиб в растянутой грани). Также результаты исследования показали, что в серии ГП-1 тип армирования Д и Е увеличивает несущую способность составных изгибаемых газобетонных перемычек в шесть раз по сравнению с типом армирования А (без армирования).

Армирование вертикальных швов с использованием внешнего полосового армирования не играет существенной роли в повышении несущей способности. Также коэффициент армирования μ в сериях ГП-1 не увеличивает несущую способность, так как внешнее армирование композиционными материалами в растянутой зоне работает взамен стержней рабочей арматуры до момента разрушения.

Тип армирование Д и Е в образцах П1-3, П1-4, П1-5 и П1-6 серии ГП-1 эквивалентны образцам П2-3 с Е-образным армированием по несущей способности на изгиб, что приводит к снижению трудоемкости устройства составной перемычки.

Оптимальным видом армирования в зависимости от несущей способности в зоне сжатия и растяжения, напряженно-деформированного состояния, прогиба, количества трещин и ширины раскрытия трещин является тип И в серии ГП-2 в образцах П2-5 и П2-7.

Установлено, что армирование лентами из углеродных волокон уменьшает деформативность газобетонных изгибаемых элементов вследствие увеличения изгибной жесткости при нагрузках до 60 % от разрушающих и вследствие изменения расчетной схемы конструкции при нагрузках свыше 60 % соответственно.

Составные газобетонные изгибаемые перемычки, армированные стальными стержнями, имеют хрупкое разрушение по сравнению с усиленными внешним полосовым армированием. С другой стороны, данное исследование показало, что составные газобетонные перемычки, усиленные лентами из углеродных волокон, также могут выдерживать требуемую нагрузку и соответствовать пределу

эксплуатационной пригодности, обеспечивая значительную экономию времени и средств.

Характер разрушения и образования трещин во всех образцах перемычек из газобетона принципиально зависят от отношения предельного усилия сдвига к усилию сдвига трещины (V_{ult}/V_{crc}). При V_{ult}/V_{crc} равном нулю, как в КП2 и П2, имеется внезапное хрупкое разрушение под точечной нагрузкой. При этом, если отношение больше 0,5, как и в других составных перемычках из газобетона, мы имеем диагональное хрупкое разрушение. С увеличением отношения V_{ult}/V_{crc} наблюдается более стабильный процесс разрушения.

Основываясь на этих ключевых выводах, можно отметить, что составные газобетонные перемычки могут быть рассчитаны по требованиям к прочности и пригодности к нормальной эксплуатации при сохранении их преимуществ, а именно долговечности, качества изготовления и времени производства. Данное исследование показало, что предельные деформации газобетонных изгибаемых элементов, усиленных внешним полосовым армированием отличаются от железобетонных балок с идентичным усилением.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке инженерного факультета университета Дияла (Баакуба, Ирак).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даулетбаев Р.Б., Вовк Б.В. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2019. №5. С. 173–177.
2. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Кондрашев К.Р., Сулейманов К.А., Пириев Ю.С. Энергосберегающие газобетоны на композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 73–83.
3. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.
4. Лободенко Е.А., Синянский И.А., Орлов Е.В. Исследование свойств ячеистобетонных перемычек, армированных композитной арматурой из армирующего волокна, для малоэтажных зданий // Системные технологии. 2019. № 1(30). С. 52–56.
5. Довженко А.В., Поздеев В.М. Оценка прочности ячеисто-бетонных балок с клееным армированием // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 236–240.
6. Довженко А.В., Поздеев В.М. Перемычки из ячеистого бетона с клееной арматурой // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2016. Т. 2. С. 31–34.
7. Memari A.M., Lepage A., Setthachayanon J. An experimental study of autoclaved aerated concrete lintels strengthened with externally bonded glass FRP // J. Reinf. Plast. Compos. 2010. № 29(22) Pp. 3322–3337. DOI: 10.1177/0731684410373413.
8. Klingner R.E., Tanner J.E., Varela J.L., Brightman M.J., Cancino U. Seismic testing of autoclaved aerated concrete shear walls: A comprehensive review // ACI Struct. J. 2005. № 102(2005). Pp. 374–382.
9. Memari A., Lepage A., Setthachayanon J. An experimental study of autoclaved aerated concrete lintels strengthened with externally bonded glass FRP // Journal of Reinforced Plastics and Composites - J REINF PLAST COMPOSITE. 2010. № 29. Pp. 3322–3337. DOI: 10.1177/0731684410373413.
10. Патент РФ на полезную модель № 2022130742, 25.11.2022. Составная ячеистобетонная перемычка // Патент России № 215740. 2022. Бюл. № 36. / Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Рябчевский И.С., Обайди А.А.Х.
11. Mousa M.A., Uddin N. Experimental and analytical study of carbon fiber-reinforced polymer (FRP)/autoclaved aerated concrete (AAC) sandwich panels // Engineering Structures. 2009. Vol. 31(10). Pp. 2337–2344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.05.009.
12. Tuncer E., Binici B., Canbay E. Behavior and design of FRP bonded autoclaved aerated concrete beams // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 282. 122712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122712.
13. Memari A.M., Eminaga A. Preliminary results on the use of GFRP as an external reinforcement for autoclaved aerated concrete // Advances in Building Technology. 2002. Pp. 865–872. DOI: 10.1016/B978-008044100-9/50109-1.
14. Chew Sp., Zulkifli A.Z., Ghayeb H, Harun S.W., Lee L.Y., Abdul Razak H., Adikan F.R.M. Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure as Compressive Strain Sensor on a Reinforced Concrete Beam // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 2017. Vol. 154. Pp. 705–710. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.10.033.
15. De Lorenzis L., Teng J.G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures // Compos. Part B Eng. 2007. Vol. 38(2). Pp. 119–143. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.08.003.

Информация об авторах

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид, исследователь кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: Adkhem@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Амелин Павел Андреевич, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мохаммедали Таха Халид, ассистент лектора. E-mail: tkhalidta@gmail.com. Университет Дияла, отдел строительства и проектов. Ирак, 32001, Баакуба, MJJ2+R9G.

Поступила 04.10.2023 г.

© Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х., Амелин П.А., Мохаммедали Т.Х., 2023

¹*Suleymanova L.A., ^{1,*}Adham A. H., ¹Amelin P.A., ²Mohammedali T.K.*

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

²*University of Diyala, Department of Construction and Projects*

**Email: Adkhem@mail.ru*

RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF JUMPERS OF AERATED CONCRETE COMPOSITES

Abstract. *In this paper, the authors study the stress-strain state of composite jumpers made of aerated concrete blocks with steel reinforcement rods and external composite reinforcement when working in bending. Rod reinforcement of jumpers is carried out by inserting steel reinforcing bars into the body of aerated concrete in the longitudinal and transverse directions. Composite reinforcement is performed with carbon fiber tapes in the stretched edge of the element over the entire width, as well as parts of tapes on the flange sides of the aerated concrete block at the vertical seam or in the center of the element. The test results are assessed by comparing the strength of the normal section and the deformability of aerated concrete bending jumpers, the effectiveness of gluing carbon fiber tapes and aerated concrete, and the optimal use of various types of reinforcement. It has been established that external composite reinforcement at a load of up to 60% of the breaking load reduces the deformability of aerated concrete bending elements due to an increase in flexural rigidity, and at a load of more than 60% due to a change in the design scheme. Jumpers with rod reinforcement have a brittle nature of destruction, while those with external composite reinforcement fail plastically. In general, the load-bearing capacity of composite aerated concrete jumpers reinforced with external composite reinforcement is sufficient to withstand operational loads.*

Keywords: *aerated concrete blocks, composite jumper, external composite reinforcement, strength, deformability, carbon fibers.*

REFERENCES

1. Dauletbayev R.B., Vovk B.V. Reliability of building structures of buildings and structures during their operation [Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij v processe ih ekspluatacii]. Innovations and investments. 2019. No. 5. Pp. 173–. (rus)
2. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kondrashev K.R., Suleymanov K.A., Piriev Yu.S. Energy-saving aerated concrete with composite binders [Energosberegayushchie gazobetonny na kompozicionnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 73–83. (rus)
3. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete

[Upravlenie processom formirovaniya poristoj struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)

4. Lobodenko E.A., Sinyansky I.A., Orlov E.V. Study of the properties of cellular concrete lintels reinforced with composite reinforcement from reinforcing fibers for low-rise buildings [Issledovanie svojstv yacheistobetonnyh peremychek, armirovannyh kompozitnoj armaturoj iz armiruyushchego volokna, dlya maloetazhnyh zdanij]. System technologies. 2019. No. 1(30). Pp. 52–56. (rus)

5. Dovzhenko A.V., Pozdeev V.M. Evaluation of the strength of cellular concrete beams with glued reinforcement [Ocenka prochnosti yacheisto-betonnyh balok s vkleennym armirovaniem]. Bulletin of

the Volzhsky regional branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. 2013. No. 16. Pp. 236–240. (rus)

6. Dovzhenko A.V., Pozdeev V.M. Lintels made of cellular concrete with glued reinforcement [Peremychki iz yacheistogo betona s vkleennoj armaturoj]. Current problems of modern science, technology and education. 2016. T. 2. Pp. 31–34. (rus)

7. Memari A.M., Lepage A., Setthachayanon J. An experimental study of autoclaved aerated concrete lintels strengthened with externally bonded glass FRP. J. Reinf. Plast. Compos. 2010. Vol. 29(22) Pp. 3322–3337. DOI: 10.1177/0731684410373413.

8. Klingner R.E., Tanner J.E., Varela J.L., Brightman M.J., Cancino U. Seismic testing of autoclaved aerated concrete shear walls: A comprehensive review. ACI Struct. J. 2005. Vol. 102(2005) Pp. 374–382.

9. Memari A., Lepage A., Setthachayanon J. An experimental study of autoclaved aerated concrete lintels strengthened with externally bonded glass FRP. Journal of Reinforced Plastics and Composites - J REINF PLAST COMPOSITE. 2010. No. 29. Pp. 3322–3337. DOI: 10.1177/0731684410373413.

10. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S., Obaidi A.A.Kh. Composite cellular concrete lintel. Patent RF, no 215740. 2022. (rus)

11. Mousa M.A., Uddin N. Experimental and analytical study of carbon fiber-reinforced polymer (FRP)/autoclaved aerated concrete (AAC) sandwich panels. Engineering Structures. 2009. Vol. 31(10). Pp. 2337–2344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.05.009.

12. Tuncer E., Binici B., Canbay E. Behavior and design of FRP bonded autoclaved aerated concrete beams. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 282. Pp. 122712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122712.

13. Memari A.M., Eminaga A. Preliminary results on the use of GFRP as an external reinforcement for autoclaved aerated concrete. Advances in Building Technology. 2002. Pp. 865–872. DOI: 10.1016/B978-008044100-9/50109-1.

14. Chew Sp., Zulkifli A.Z., Ghayeb H, Harun S.W., Lee L.Y., Abdul Razak H., Adikan F.R.M. Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure as Compressive Strain Sensor on a Reinforced Concrete Beam. Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 2017. Vol. 154. Pp. 705–710. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.10.033.

15. De Lorenzis L., Teng J.G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. Compos. Part B Eng. 2007. Vol. 38(2). Pp. 119–143. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.08.003.

Information about the authors

Suleymanova, Lyudmila A. DSc, Professor, Head of the Department of Construction and Municipal Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Obaidi Adham Abdulsattar Hameed. Researcher, Department of Civil Engineering and Urban Development. E-mail: Adkhem@mail.ru. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Amelin, Pavel A. Postgraduate student of the department of construction and urban economy. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Mohammedali Taha Khalid. Lecturer's assistant. E-mail: tkhalidtaha@gmail.com. Diyala University, Department of Construction and Projects, Iraq, 32001, Baqubah, MJJ2+R9G.

Received 04.10.2023

Для цитирования:

Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х., Амелин П.А., Мохаммедали Т.Х. Исследование напряженно-деформированного состояния перемычек газобетонных составных // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-32-40

For citation:

Suleymanova L.A., Adham A.H., Amelin P.A., Mohammedali T.K. Research of stress-strain state of jumpers of aerated concrete composites. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-32-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

Фан Ч.Д.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: phanchungduc@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПЛИТНЫХ И СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье рассмотрена возможность оценки жесткостных и прочностных характеристик по толщине плитных и стеновых конструкций по результатам экспериментальных исследований измерений скоростей распространения изгибных волн различных диапазонов частот. Построены теоретические дисперсионные кривые скоростей изгибных волн в зависимости от их длин для плитных конструкций различных характеристик при различной толщине. Представлена формула определения скоростей распространения поверхностной рэлеевской волны. Отсюда определены жесткостные характеристики по корреляционным зависимостям между ними и скоростью распространения продольной волны. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов для оценки состояния материалов по толщине плит. Проведены экспериментальные измерения скоростей распространения изгибных волн на стенах существующего здания в г. Санкт-Петербурге и произведена первичная оценка жесткостных свойств кладки и контроль проектной толщины стены. Результаты проведенных исследований подтвердили возможность оценки характеристик состояния материалов по толщине плитных и стеновых конструкций путем сопоставления экспериментальных исследований измерений скоростей распространения изгибных волн на различных диапазонах частот. Использование метода изгибных волн также позволяет осуществлять контроль проектной толщины плиты, стены и обделки при одностороннем доступе.

Ключевые слова: скорость изгибных волн, жесткостные характеристики, толщины плиты, экспериментальные исследования, акустические диапазоны частот.

Введение. На сегодняшний день обследование зданий и сооружений ставит перед нами множество сложных задач и проблем, особенно при оценке физико-механических характеристик материалов строительных конструкций в труднодоступных местах (фундамент, фундаментные стены, перекрытия, покрытия...) при проведении изысканий, а также для многослойных конструкций [1, 2]. Поскольку эти конструкции являются одними из самых уязвимых и сложных участков для проверки, и, как правило, требуют надежной оценки состояния материалов (их прочность, отсутствие или наличие локальных дефектных зон, соответствие толщины проектной). В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем развитии современных методов диагностики прочностных характеристик строительных материалов.

Кроме того, с точки зрения экономики, для уменьшения трудозатрат в человеко-часах и продолжения процесса эксплуатации зданий и сооружений при их обследовании, развитие различных современных неразрушающих методов является весьма важным и неизбежным [3–6]. Применения разрушающих методов, несмотря на все их преимущества, отличаются высокой трудоемкостью и необходимостью проведения высококвалифицированных камеральных исследований [7].

Несмотря на очевидные преимущества, большинство неразрушающих методов также имеют некоторые ограничения и недостатки. Обычно испытания с использованием неразрушающих методов нам дают нам косвенные результаты, поэтому надежность и достоверность их не очень высока. И эти результаты оцениваются только для типично отдельных точек либо верхних слоев конструкций [8] и иногда это не полностью отражает все характеристики, а также свойства материалов всей обследуемой конструкции. Кроме того, для правильной и полной оценки качества зданий и сооружений также следует учитывать ограничения доступа к некоторым элементам конструкций (фундаментные стены, стены и плиты перекрытий и покрытия). Проблема разработки методики, которая позволяет одновременно получать большой объем данных с требуемой достоверностью на протяженных участках измерений и даже при одностороннем доступе к конструкции, очень важна и актуальна.

В настоящее время на наш взгляд, метод [9–13] с использованием изгибных волн акустического диапазона частот показал свою эффективность благодаря способности использовать волны с малым затуханием в материале конструкций по сравнению с ультразвуковым методом. Это позволяет одновременно получать

большой объем данных на протяженных измерительных створах даже при одностороннем доступе к конструкции, что раньше было практически невозможно и относилось только к измерениям только по наружной поверхности [14].

Материалы и методы. Для дальнейшего исследования характера распространения в плитах и стенах волн различной длины волны следует рассмотреть теоретические выводы Лэмба [15-17], который показал, что при возбуждении в сплошной однородной бесконечной плите непрерывных синусоидальных колебаний в ней рас-

пространяется два типа волн. Как известно: первый тип – симметричный; второй тип – антисимметричный, см. рис. 1. В симметричных волнах колебание материальных точек симметрично по отношению к средней плоскости плиты, т.е. в верхней и нижней половинах пластины смещение U_x имеет одинаковые знаки, а смещение U_z – противоположные. В антисимметричных волнах вид колебания деформирует плиту подобно изгибающей нагрузке, поэтому эти волны называются изгибными. В этом случае смещение U_x имеет противоположные знаки, а смещение U_z – одинаковые.

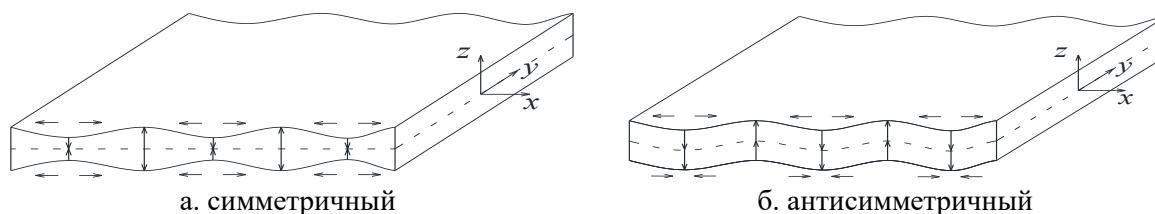


Рис. 1. Волны Лэмба

Согласно [18] уравнения распространения упругих волн через скалярный ϕ и векторный потенциал ψ в однородной плите имеет вид:

$$\Delta\phi + k_l^2\phi = 0; \Delta\psi + k_t^2\psi = 0 \quad (1)$$

где: $k_l = \omega\sqrt{\rho/(\lambda + 2\nu)}$, $k_t = \omega\sqrt{\rho/\nu}$ – волновые числа соответственно продольных и поперечных волн; ρ – плотность среды; λ , ν – упругие константы Ламе.

Следуя Лэмбу, общее решение системы уравнений (1) может быть представлено в таком виде:

$$\begin{aligned} \phi &= A \exp(-qz + i(kx - \omega t)); \\ \psi &= B \exp(-sz + i(kx - \omega t)) \end{aligned} \quad (2)$$

где $q = k^2 - k_l^2$, $s = k^2 - k_t^2$; k – волновое число волн Лэмба; A , B – постоянные.

Анализируя выражения (2) с учетом следующих граничных условий:

- Смещение частицы только по осям X , Z ;
- Напряжения на граничных поверхностях $z = \pm H/2$ равны нулю;

Тогда дисперсионную кривую для основных колебаний антисимметричных волн определяют из характеристического уравнения [19-22], полученного Лэмбом:

$$\frac{\text{th}\beta_1 H/2}{\text{th}\beta_2 H/2} = \frac{4\beta_1\beta_2}{\eta^2\xi^2} \quad (3)$$

в котором $\xi = 2\pi/\lambda$ – номер моды колебания;

$$\beta_1 = \xi\sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}}; \beta_2 = \xi\sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}}; \eta = 2 - \frac{V_u^2}{V_s^2}; V_u -$$

фазовая скорость; V_p – скорость продольной волны; V_s – скорость поперечной волны.

Используя соотношения между упругими константами Ламе, динамическим модулем упругости E_d и коэффициентом Пуассона μ_d , получены выражения основных скоростей распространения упругих волн.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu_d)}{\rho(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \mu_d)}} \quad (5)$$

Основными типами волн, распространяющимися в строительных конструкциях, являются объемные (продольные и поперечные), а также каналовые (стержневые, пластинчатые, поверхностные и изгибные). Их скорость связана с коэффициентом Пуассона, что позволяет легко определять упругие характеристики строительных материалов. Теория упругости дает следующие соотношения между скоростями этих волн (рис. 2):

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \quad (6)$$

$$\frac{V_R}{V_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \cdot \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \quad (7)$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \quad (8)$$

$$\frac{V_d}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{1-\mu}} (1+\mu) \quad (9)$$

$$\frac{V_{пл}}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}} \quad (10)$$

где V_p – скорость продольной волны; V_s – скорость поперечной волны; V_R – скорость рэлеевской волны; V_d – скорость стержневой волны; $V_{пл}$ – скорость пластинчатой волны; μ – коэффициент Пуассона.

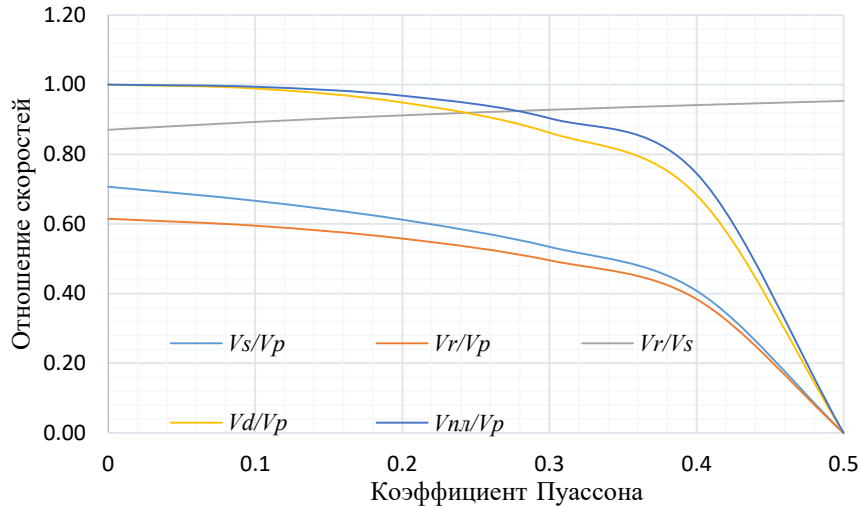


Рис. 2. Теоретические зависимости отношения скоростей от коэффициента Пуассона

Из уравнений (3, 6, 7, 8) следует, что зависимость между безразмерными параметрами $\frac{V_u}{V_R}$ и $\frac{\lambda}{H}$ может быть выражено как:

$$(3) \Leftrightarrow \frac{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}}\right)}{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}}\right)} = \frac{4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_u^2}{V_p^2}\right) \left(1 - \frac{V_u^2}{V_s^2}\right)}}{\left(2 - \frac{V_u^2}{V_s^2}\right)^2} \quad (11)$$

$\Leftrightarrow$

$$\frac{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2 (1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2 (1-\mu)(1+\mu)^2}}\right)}{th\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_u^2 (0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2 (1+\mu)^2}}\right)} = \frac{4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_u^2 (1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2 (1-\mu)(1+\mu)^2}\right) \left(1 - \frac{V_u^2 (0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2 (1+\mu)^2}\right)}}{\left(2 - \frac{V_u^2 (0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2 (1+\mu)^2}\right)^2} \quad (12)$$

По уравнению (10) легко доказать, что при $f = 0$ $V_u/V_R \rightarrow 0$, а при $f = \infty$ $V_u/V_R \rightarrow 1$, и тогда V_u

$= V_R$. Из теоретических формул упругости после преобразования уравнения (10) получаем:

$$(p-1)\alpha^{g+h} - (p+1)\alpha^g + (p+1)\alpha^h - (p-1) = 0 \quad (13)$$

$$\text{где } p = \frac{4gh}{(1+h^2)^2}; \quad g = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{2V_R^2} \frac{(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{(1-\mu)(1+\mu)^2}}; \quad h = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_R^2} \frac{(0,87+1,12\mu)^2}{(1+\mu)^2}}; \quad \alpha = e^{2\pi H/\lambda_B};$$

λ_B – Длина волны; V_R – скорость Рэлеевской волны; μ – коэффициент Пуассона.

Конечное решение из уравнения (13) представляет собой теоретическую зависимость между скоростью изгибной волны и ее длиной, которую можно использовать для решений следующих задач:

- Определение жесткостных характеристик строительных материалов
- Контроль качества, выявление дефектов и повреждений конструкций

- Определение прочности бетона и каменной кладки
- Определение толщины плиты, стены и фундаментных стен

Проведение наблюдений на скорости распространения изгибных волн имеет свои особенности, обусловленные как физическими условиями, так и спецификой решаемых задач. Физические условия сводятся к тому, что наблюдения

выполняют на слоях плиты, имеющих разные физико-механические свойства по толщине или ограниченные размеры. Из уравнения (13) видно, что волна распространяется со скоростью, которая зависит от ее длины, а также от толщины и упругих свойств плит.

Для различных значений коэффициента Пуассона при решении уравнения (13) получено множество значений λ/H и соответствующих значений V_w/V_R , которые приведены на рис. 3.

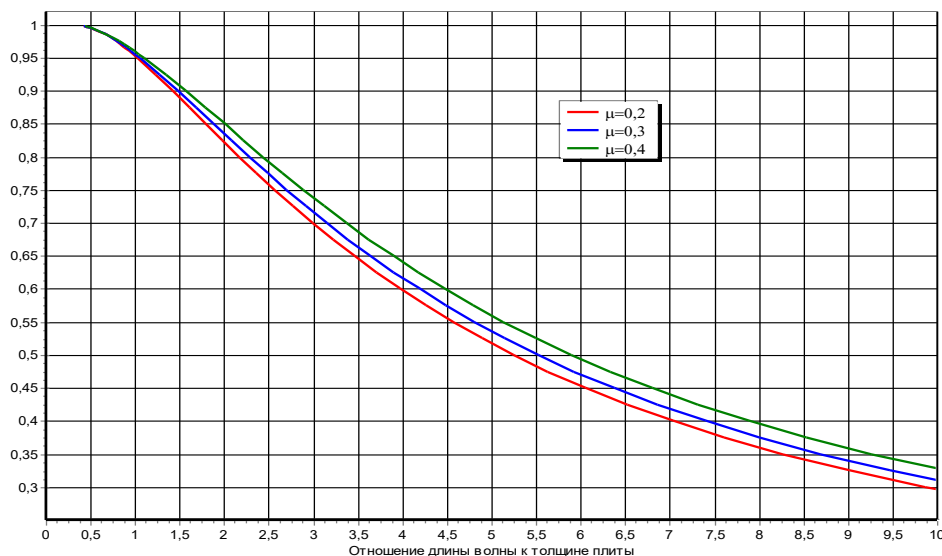


Рис. 3. Графики дисперсионных кривых при различных значениях коэффициента Пуассона

В любом случае предполагается, что динамический коэффициент Пуассона плиты и стены известен. Ошибки в определении скорости продольной волны, если μ меняется от 0,2 до 0,3, менее $\pm 2, 3\%$.

Изучение реакций конструкции в разных частотных диапазонах дает нам лучший результат для оценки характеристик строительных материалов конструкций при обследовании здания и сооружений. Результаты решения прямых задач реакций конструкции для бетона различных прочностей показан на рисунке 4.

По уравнению (13) также можно решить обратную задачу для определения толщин

конструкций пластинчатого типа. Результаты теоретических дисперсионных кривых для бетона при различных толщинах плит показан на рисунке 5.

Джонсом было доказано [23, 24], что для реальных сред при распространении изгибных волн должно выполняться условие $0,4 < V_w/V_R < 0,7$. Следует подчеркнуть, что в этом диапазоне значений кривая на графике представляет собой отрезок прямой линии. При этом мы можем написать уравнение прямой с использованием рис. 3, 4 в случае $\mu = 0,25$:

$$\frac{V_R}{V_w} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \quad (14)$$

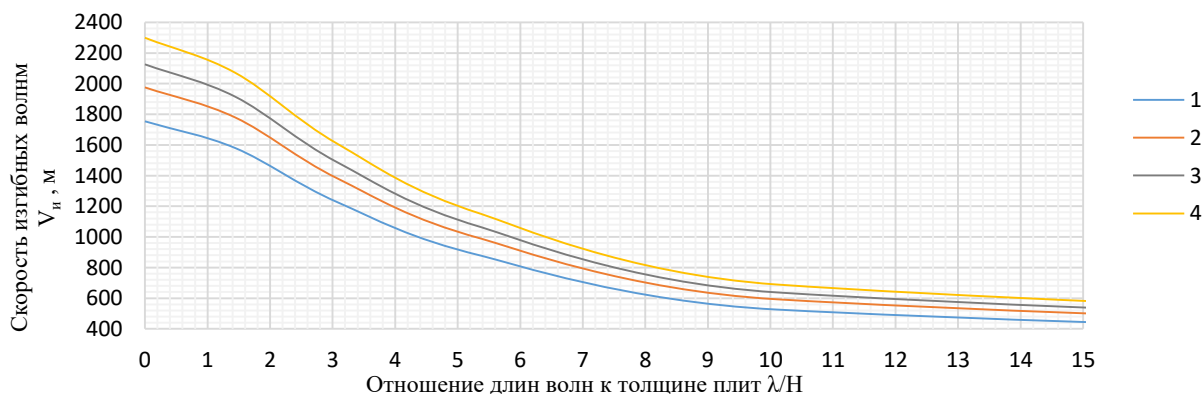
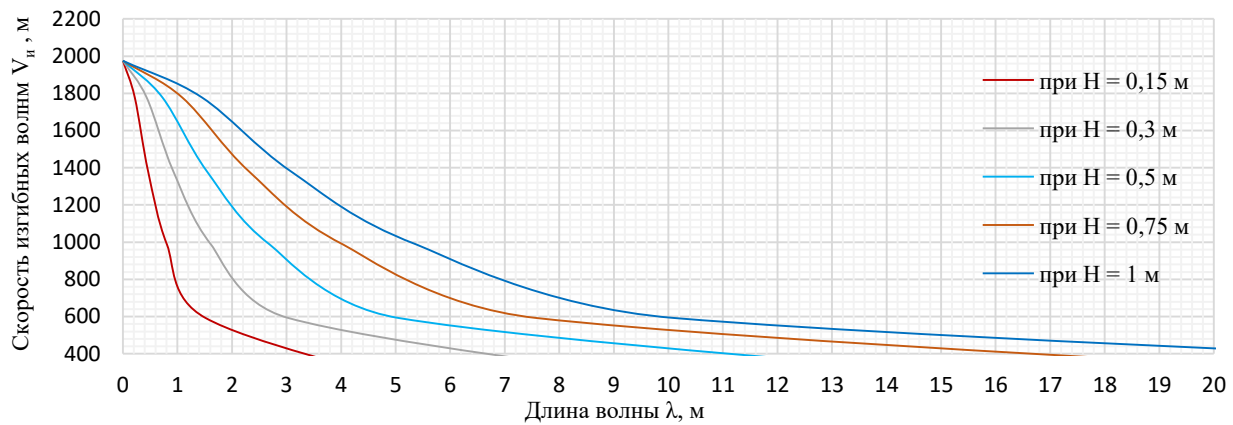


Рис. 4. Дисперсионные кривые для бетона различных прочностей
(1 – $E_d = 22000$ МПа, 2 – $E_d = 27500$ МПа, 3 – $E_d = 32000$ МПа, 4 – $E_d = 37500$ МПа)

Рис. 5. Дисперсионные кривые для бетона с $E_d = 27500$ МПа (при различных толщинах плит)

А среднее значение скорости рэлеевской волны определяется по формуле

$$\bar{V}_R = \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_n^i}{\int_a^b \frac{1}{0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}} d\left(\frac{\lambda}{H}\right)} = 0,26 \cdot \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_n^i}{\ln\left(0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}\right) \Big|_a^b} \quad (15)$$

где k – количество отсчетов фазовых скоростей в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_w/V_R < 0,7$; a, b – значения отношения λ/H , соответственно, при $V_w/V_R = 0,7$ и $0,4$

Тогда динамический модуль упругости вычисляют по формуле:

$$\bar{E}_d = 2,95 \rho \bar{V}_R^2 \quad (16)$$

Особенности распространения упругих волн в кладке

Кирпичные кладки могут быть представлены в виде чередующихся слоев материалов кирпича и раствора толщиной h_1 и h_2 , обладающих различными плотностями ρ_1, ρ_2 , модулями деформации и разными коэффициентами Пуассона (E_1, E_2, μ_1, μ_2). Особенности распространения упругих волн в слоистых средах подобно рассмотрены в работах Рытов С.М., Бреховских Л. М. [25, 26]. Сравнительно простым является уравнение для распространения колебаний продольных волн перпендикулярно слоям [24]:

$$\cos \frac{2\pi f}{V_f} (h_1 + h_2) - \cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm + D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm = 0 \quad (17)$$

где V_f – фазовая скорость продольных колебаний с частотой f ; $\beta = \frac{h_1}{\lambda} = \frac{h_1 f}{V_1}$; $q = V_1 / V_2$; $m = h_2 / h_1$; $D = \frac{V_1^2 \rho_1^2 + V_2^2 \rho_2^2}{2V_1 \rho_1 V_2 \rho_2}$

где V_1, V_2 – скорости продольных волн в слоях мощностью h_1 и h_2 , плотностью ρ_1 и ρ_2 .
Общее решение уравнения представлено в таком виде:

$$V_f = \frac{2\pi f h_1 (1+m)}{\arccos(\cos 2\pi\beta \cos 2\pi\beta qm - D \sin 2\pi\beta \sin 2\pi\beta qm)} \quad (18)$$

Из которого следует, что V_f – функция параметра β . При $\beta \rightarrow 0$, т.е. $\lambda \gg h_1$, $V_f \rightarrow V_o$, где

$$V_o = \frac{V_1(1+m)}{\sqrt{1+q^2 m^2 + 2Dqm}}$$

Если $\beta \rightarrow \infty$, т.е. $\lambda \ll h_1$, $V_f \rightarrow V_\infty$, то

$$V_\infty = \frac{V_1(1+m)}{1+qm}$$

Для оценки различия фазовых скоростей V_∞ и V_o рассмотрим отношение:

$$\alpha = \frac{V_\infty}{V_o} = \sqrt{1 + \frac{2qm(D-1)}{(1+qm)^2}} \quad (19)$$

Принимаем $\rho_1/\rho_2 = 1$ то зависимость V_∞/V_o от V_2/V_1 для различных h_2/h_1 представлена на рисунке 6:

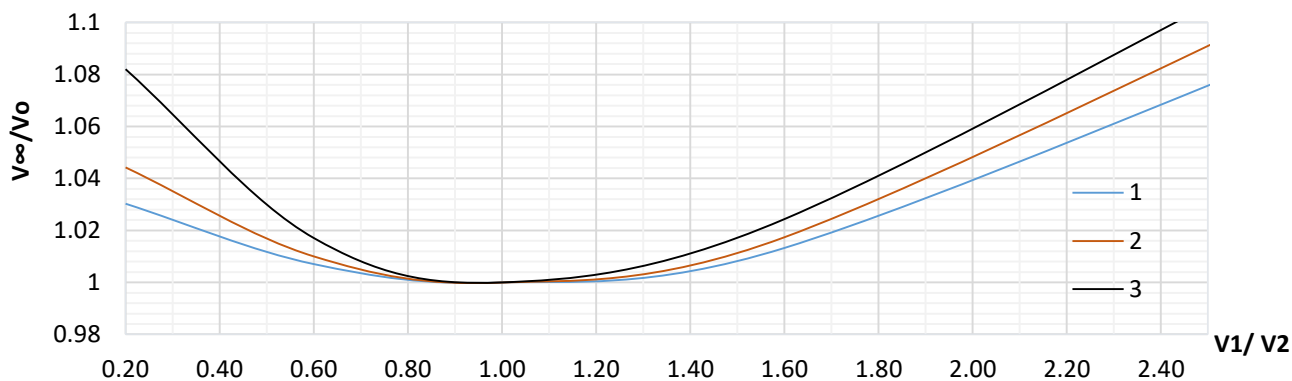


Рис. 6. Зависимость V_{∞}/V_0 от V_1/V_2 для различных h_2/h_1 при $\rho_1/\rho_2 = 1$
(1 - $h_2/h_1=0,1$; 2 - $h_2/h_1=0,2$; 3 - $h_2/h_1=0,3$)

На рисунке видно, что чем ближе отношение V_{∞}/V_0 к единице, тем более однородной является конструкция. При рассмотрении отношения V_f/V_0 заметим, что в целом оно с уменьшением β понижается. Для кирпичных кладок при использовании волн с длиной $\lambda \gg h = h_1 + h_2$ такая мелкослоистая среда, как кладка, может рассматриваться как однородная.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Суть разработанной нами методики заключается в возбуждении ударом широкого спектра изгибных волн и измерении параметров их распространения с помощью датчиков, образующих

измерительный луч, в котором все точки измерения с постоянным шагом располагаются на одной прямой с точкой удара. Схема экспериментальных исследований была проведена на рисунке 7.

Полученные реализации (см. рис. 8) фильтруются полосовыми фильтрами для разделения на отдельные пучки монохроматических волн и для каждого пучка строятся годографы распространения волны (рис. 9), по которым определяются скорость и длина волны. Результаты обработки используются для построения дисперсионных кривых и, при необходимости, годографов скорости поверхностных волн.

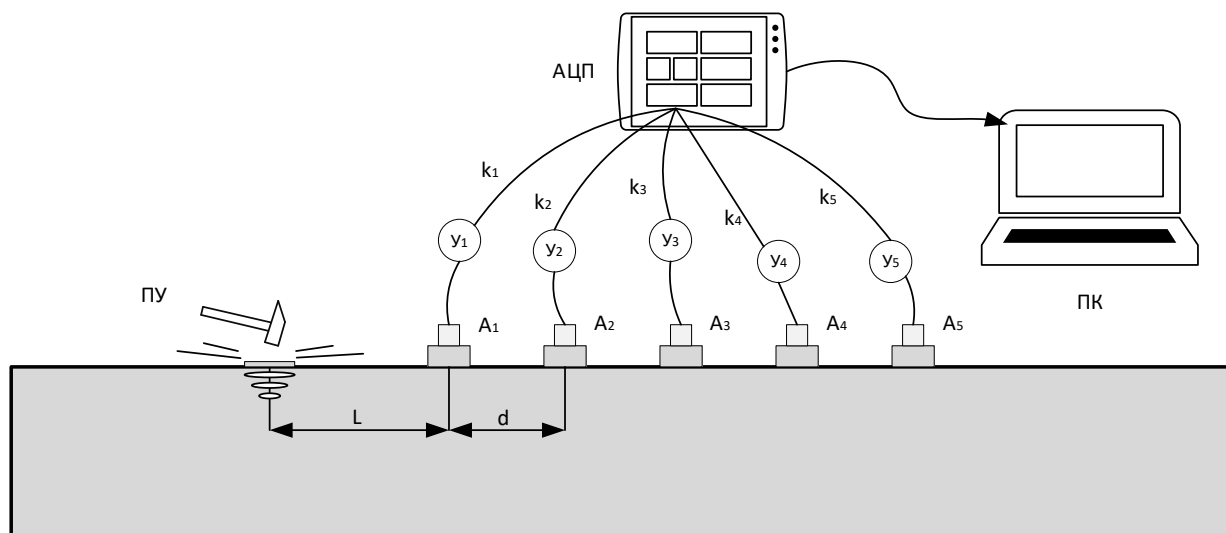


Рис. 7. Схема проведения эксперимента

A_1-A_5 – акселерометры; ПУ – точки приложения ударов; k_1-k_5 – антивибрационные кабели; Y_1-Y_5 – согласующие усилители; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

Предложенный метод позволяет проводить обследование строительных конструкций, в том числе с переменными по глубине конструкции физико-механическими характеристиками их материалов.

Некоторые результаты обследования с использованием поверхностных волн приведены

ниже. На рис. 10–12 приведены дисперсионные кривые, полученные в массиве железобетона толщиной 1,7 м для различных характеристик состояния бетона по толщине конструкции. Там же приведены теоретические дисперсионные кривые поверхностных волн для однородной по толщине плиты (сплошные линии).

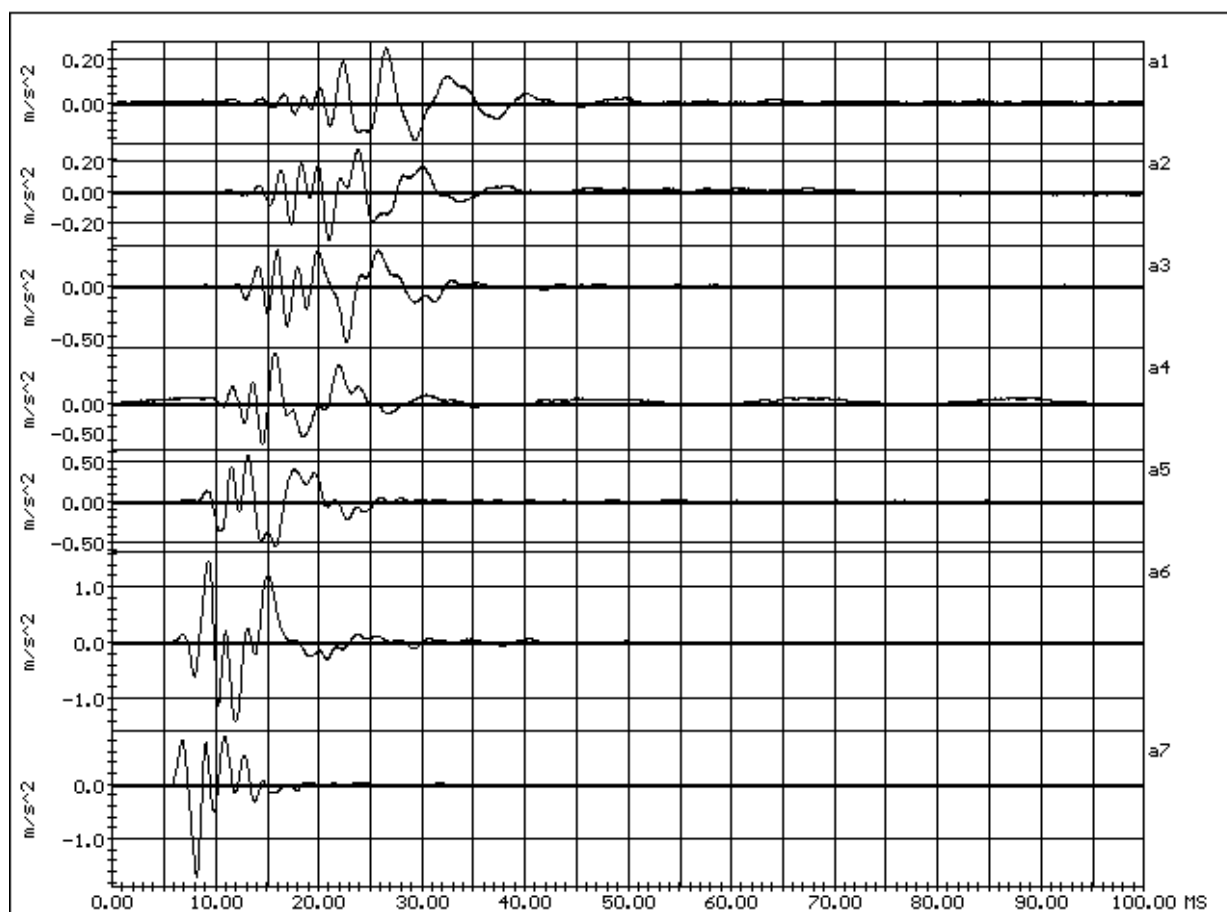


Рис. 8. Пример исходных реализаций (по вертикальной оси справа обозначены номера датчиков, слева – ускорения в м/с^2 . По горизонтальной оси отложено время в микросекундах)

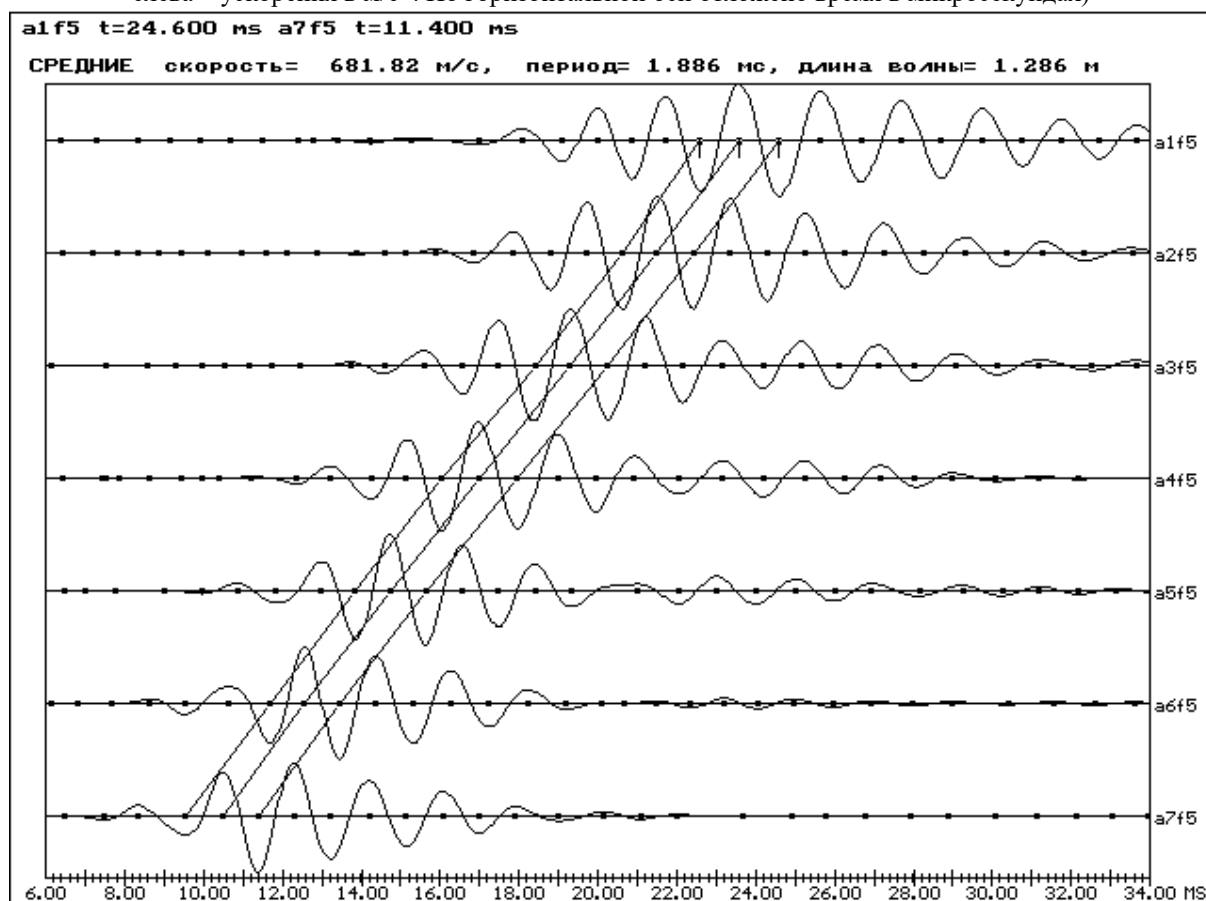


Рис. 9. Пример пучка монохроматических волн с годографами распространения волн

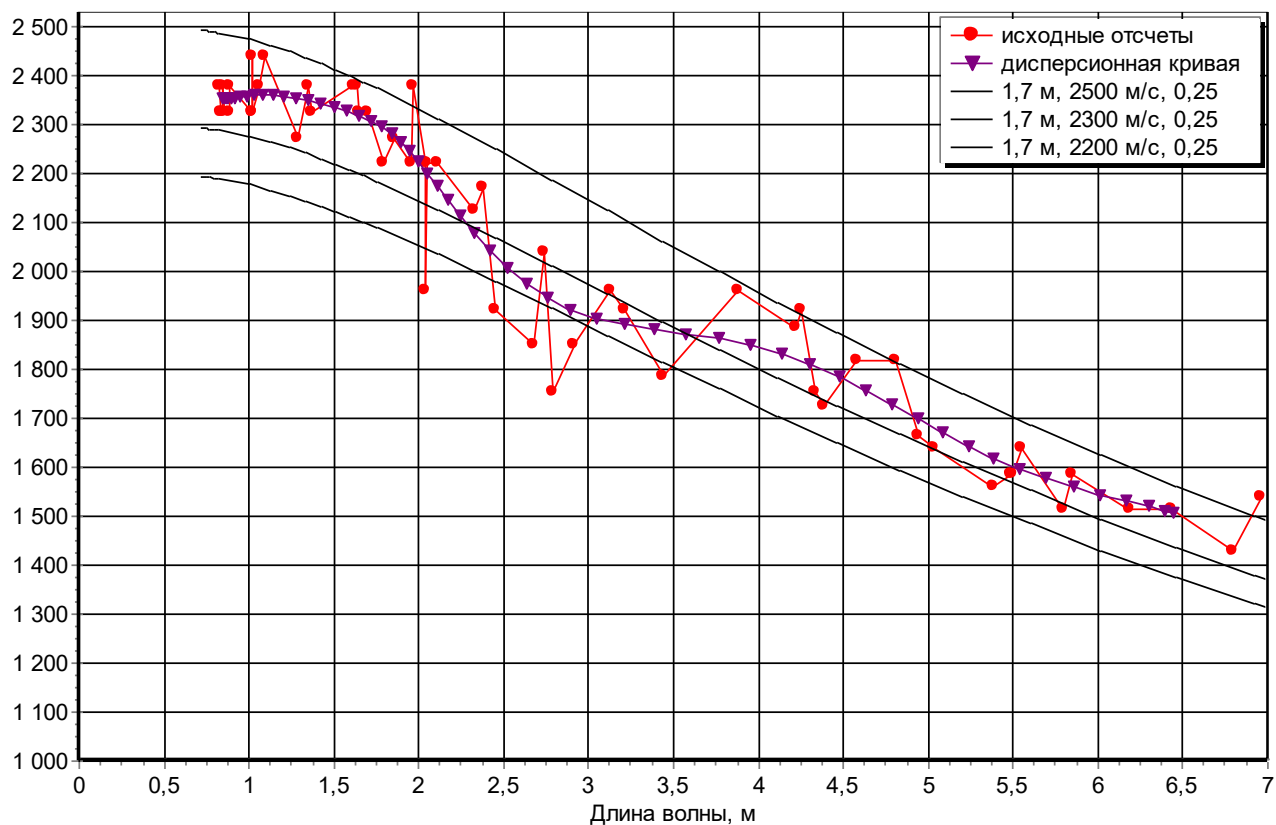


Рис. 10. Дисперсионная кривая для массива с постоянными по толщине конструкции характеристиками бетона

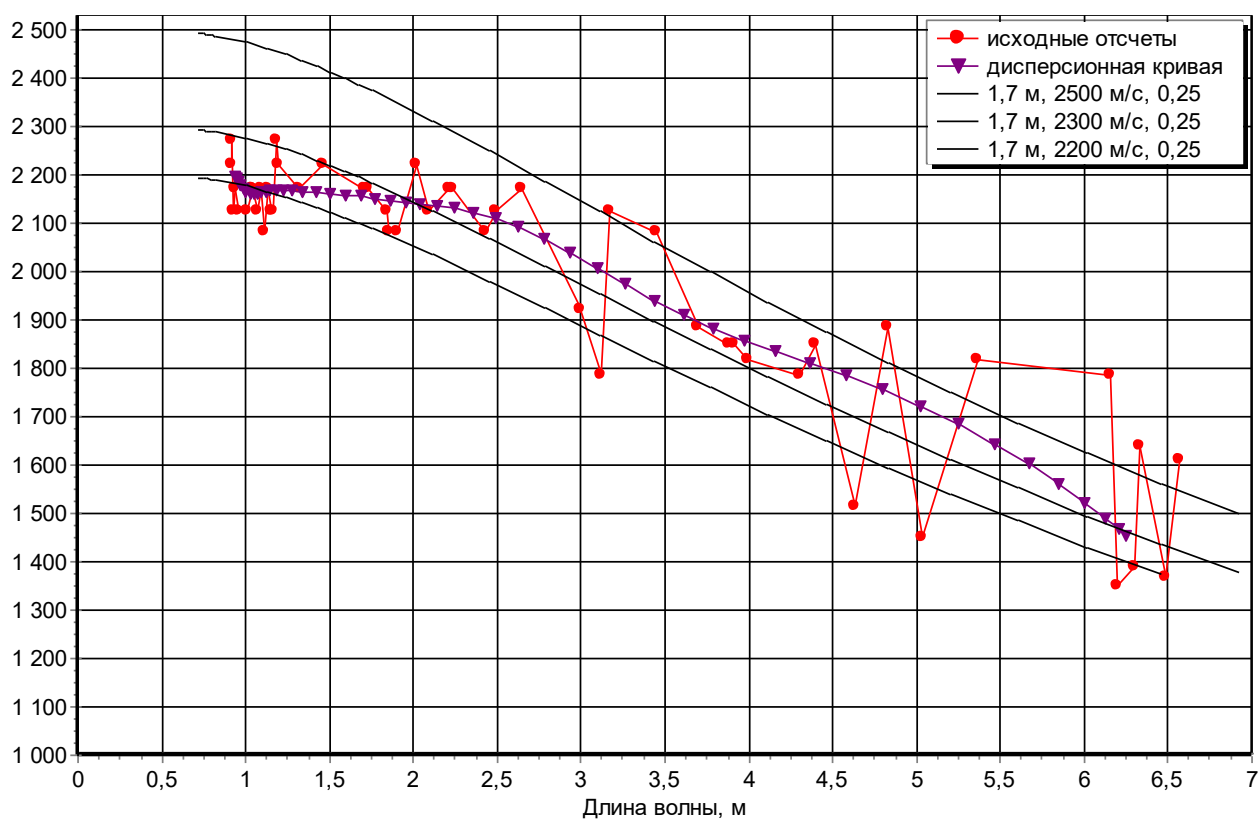


Рис. 11. Дисперсионная кривая массива с ослабленным поверхностным слоем бетона

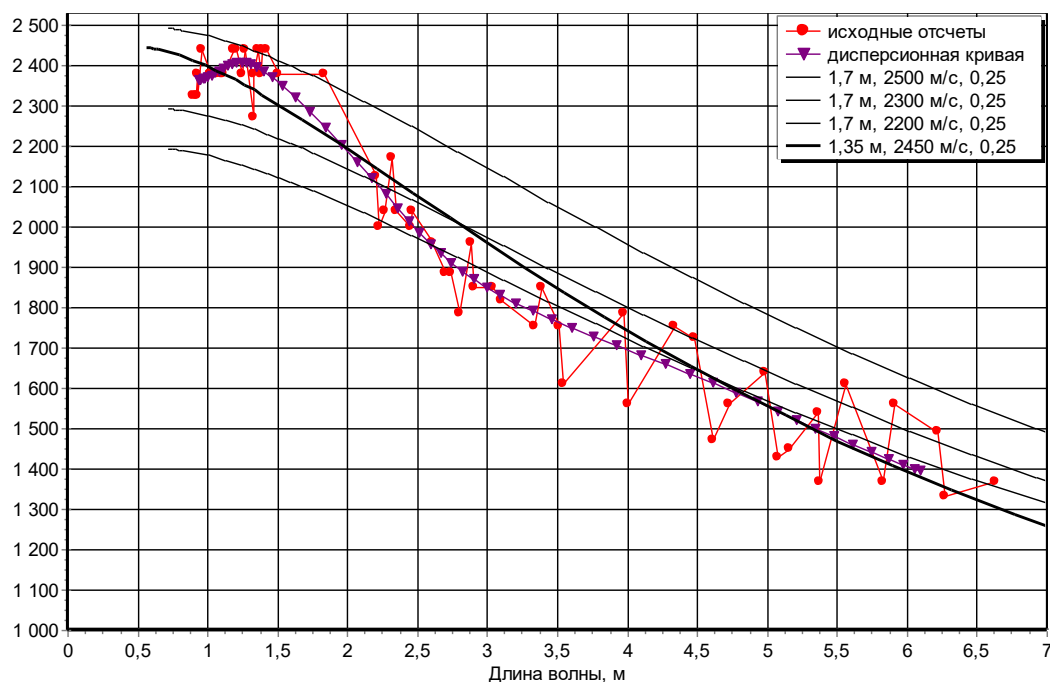


Рис. 12. Дисперсионная кривая для массива с ослабленным слоем бетона в глубине массива

Таким образом, с использованием поверхностных волн можно не только оценивать состояние массива в целом, но для толстостенных конструкций также оценивать состояние отдельных слоев.

Метод изгибной волны используется для оценки состояния материала в строительных конструкциях, в том числе толстостенных, при наличии доступа только к одной поверхности конструкции. Для кирпичной кладки и бетона имеются зависимости прочности от скорости продольной волны, по которым может определяться осевая прочность материалов строительных конструкций.

Проверка проектной толщины и определение жесткостных характеристик кирпичной кладки стен существующего здания на Каменно-островском проспекте д. 61 выполнялись в соответствии со схемой инструментального обследования, приведенной на Рисунке 7. А схема проведения испытаний с измерительным комплексом представлена на рисунке 13, результаты дисперсионных кривых распространения изгибных волн в кладке в зависимости от их длин показаны на рисунке 14.



Рис. 13. Схема проведения испытаний с измерительным комплексом

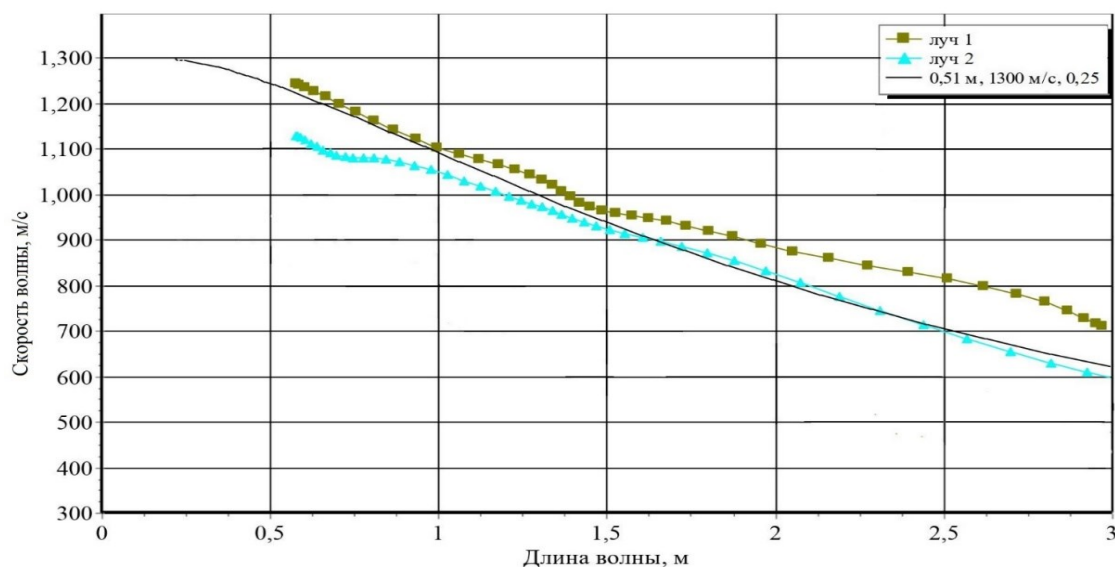


Рис. 14. Дисперсионные кривые изгибных волн в кладке

По результатам зондирования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлеевской волны V_R . По скорости рэлеевской волны в материале стен, исполь-

зуя теорию упругости, легко найти значение скорости продольной волны V_P и определить упругие характеристики материалов конструкций E_d . Результаты после обработки данных дисперсионных кривых, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Оценка проектной толщины и жесткостных характеристик кладки стен зданий

Обслед. здание	Дис- пер. кри- вые	V_R , м/с	Факт. тол- щина, м	E_d , МПа	λ , м	Тол- щина, м	Сред. значе- ние	Погреш- ность	$\bar{V}_R$, м/с	$\bar{E}_d$, МПа	Погреш- ность
Каменно- островский проспект д. 61	Луч 1	1300	0,51	8725	1–1,5	0,52	0,57	11,7 %	1403	10162	16,5%
					1,5–2	0,57					
					2–2,5	0,63					
	Луч 2				1–1,5	0,47	0,50	2,0 %	1284	8511	2,4%
					1,5–2	0,52					
					2–2,5	0,53					

Полученные результаты показали хорошее совпадение с данными прямых испытаний осевой прочности кирпичной кладки. При определении толщины кладки у луча №1 существует погрешность (11,7 %), различия которой обусловлены разницей между экспериментальными дисперсионными кривыми и теоретическими (сплошная черная линия в рис. 6). Фазовые скорости распространения изгибных волн в области коротких длин волн ближе к теоретическим значениям. А в других диапазонах эти значения превышают теоретические. Это значит, что внутренний слой кладки прочнее чем поверхностный и в таблице 1 показана разница динамических модулей упругости общей толщины и поверхностных. Она составляет 16,5 %.

Выводы

Разработан метод зондирования плитных и стеновых конструкций, основанный на теории Лэмба в приложении к изгибным волнам. Пред-

ставлена формула определения скоростей распространения поверхностной рэлеевской волны. Отсюда определены жесткостные характеристики по корреляционным зависимостям между ними и скоростью распространения продольной волны. Предлагаемый метод позволил решить проблему зондирования конструкций при интенсивном рассеянии энергии упругих волн в материале, в том числе, и при одностороннем доступе. По построенным дисперсионным кривым (зависимости скоростей распространения изгибных волн от их длины) предложенный метод позволяет оценить наличие дефектов, повреждений, их размеры и ориентировочное положение. Метод рекомендуется использовать также для контроля проектной толщины плитных, стеновых и фундаментных конструкций, а также для отделки подземных сооружений.

Благодарности. «Автор выражает благодарность профессору Савину Сергею Николаевичу за полезные замечания и важнейшие советы

при проведении исследования и оформления данной статьи. Также хочу поблагодарить коллегам 23 ГМПИ г. Санкт-Петербург. Данная работа выполнена при его поддержке».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давидюк А.А. Анализ результатов обследования многослойных наружных стен многоэтажных каркасных зданий // Жилищное строительство. 2010. № 6. С. 21–26.
2. Новикова С. Аналіз результатів обстеження зовнішніх багатошарових стін з облицюванням цеглою // Будівельні матеріали та вироб. 2018. 5-6(99). 106–108. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-99-14>.
3. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 4. С. 10–15.
4. Добромислов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. М.: МГСУ; АСВ, 2006. 256 с.
5. Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: АСВ, 2004. 240 с.
6. Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Нотенко С.Н., Римшин В.И., Ройтман А.Г. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2004. 447 с.
7. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. 243 с.
8. Букин А.В., Патраков А.Н. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля // Construction and Geotechnics. 2010. №1. 89–94.
9. Савин С.Н., Данилов И.Л. Сейсмобезопасность зданий и сооружений. СПб.: Лань, 2021. 200 с.
10. Marazzani J., Cavalagli N., Gusella V. Elastic Properties Estimation of Masonry Walls through the Propagation of Elastic Waves: An Experimental Investigation // Appl. Sci. 2021. 11. 9091. DOI: 10.3390/app11199091
11. Savin S., Tsakalidis V. The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction // COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. 5. Pp. 706–720.
12. Фан Ч.Д., Савин Д.А. Метод определения жесткостных характеристик строительных конструкций с использованием изгибных волн // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). 28–34.
13. Фан Ч.Д. Определение прочности каменных конструкций методом с использованием скоростей изгибных акустических волн // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6 (95). 21–29.
14. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1988. 57 с.
15. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.
16. Vahid T., Sourav B. Generalized Analytical Dispersion Equations for Guided Rayleigh-Lamb waves and Shear Horizontal (SH) waves in Corrugated Waveguides // International Journal of Solids and Structures. 2020. 202. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2020.05.026
17. Achenbach J.D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam; London: North-Holland Publishing Co, 1973. 430 с.
18. Viktorov I. Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications: Springer Science+Business Media: New York, NY, USA, 1967. 154 p.
19. Савин С.Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 43–54.
20. Ильяшенко А.В., Кузнецов С.В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 3–21.
21. Šofer M., Ferfecki P., Šofer P. Numerical solution of Rayleigh-Lamb frequency equation for real, imaginary and complex wavenumbers // Matec web conf. 2018. Vol. 157. DOI:10.1051/matec-conf/201815708011
22. Lu C., Hua J., Wang Z., Lin J. Detection and localization of closely distributed damages via lamb wave sparse reconstruction // Vibroengineering PROCEDIA. 2017. Vol. 14. Pp. 115–119. DOI: 10.21595/vp.2017.19222.
23. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов / пер. с рум. В. М. Маслобойщикова. М.: Стройиздат. 1974. 296 с.
24. Алешин Н.Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. М.: Стройиздат. 1982. 156 с.
25. Рытов С.М. Акустические свойства мелкослоистой среды // Акуст. Журн. 1964. Т.10, №1. С. 16–18.
26. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. М.: Наука. 1973. 343 с.

Информация об авторах

Фан Чунг Дык, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: phanchungduc@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 13 Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 20.11.2023 г.

© Фан Ч.Д., 2023

Phan Ch.D.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: phanchungduc@gmail.com

APPLICATION OF THE BENDING WAVE METHOD FOR INSPECTION OF SLAB AND WALL STRUCTURES

Abstract. *The paper considers the possibility of estimating the stiffness and strength characteristics of slab and wall structures by thickness based on the results of experimental studies of measurements of bending wave propagation velocities of different frequency ranges. Theoretical dispersion curves of bending wave velocities as a function of their lengths for plate structures of different characteristics at different thicknesses are constructed. Comparison of theoretical and experimental results for estimation of the state of materials by the thickness of slabs has been carried out. Experimental measurements of bending wave propagation velocities on the walls of an existing building in St. Petersburg have been carried out, and the primary assessment of masonry stiffness properties and control of the design wall thickness have been performed. The results of the studies confirmed the possibility of assessing the characteristic of the state of materials in the thickness of slab and wall structures by comparing experimental studies of bending wave propagation velocity measurements at different frequency ranges. The use of bending wave method also allows controlling the design thickness of slab, wall and lining at one-sided access.*

Keywords: *bending wave velocity, stiffness characteristics, plate thickness, experimental studies, different frequency ranges*

REFERENCES

1. Davidyuk A.A. Analysis of the results of inspection of multilayer external walls of multistory frame buildings [Analiz rezul'tatov obsledovaniya mnogoslojnyh naruzhnyh sten mnogoetazhnyh karkasnyh zdaniy]. Housing construction. 2010. No. 6. Pp. 21–26. (rus)
2. Novikova S. analysis of the results of the survey of external multilayer walls with brick cladding. Building materials and products. 2018. (5-6(99)). 106–108. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-99-14>.
3. Ulybin A.V. On the choice of methods of concrete strength control of constructed structures. Magazine of Civil Engineering [O vybore metodov kontrolya prochnosti betona postroennyh sooruzhenij]. 2011. No. 4. Pp. 10–15. (rus)
4. Dobromyslov, A. N. Diagnosis of damage to buildings and engineering structures [Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernyh sooruzhenij]. Moscow, MGSU: ASV Publ., 2006. 256 p. (rus)
5. Zemlyansky A.A. Survey and testing of buildings and structures [Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzhenij]. A. A. Zemlyansky. Moscow, ASV Publ., 2004. 240 p. (rus)
6. Kozachek V.G., Nechaev N.V., Notenko S.N., Rimshin V.I., Roitman A.G. Inspection and testing of buildings and structures [Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzhenij]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2004. 447 p. (rus)
7. Kanevskiy I.N., Salnikova E. N. N. Nondestructive methods of control [Nerazrushayushchie metody kontrolya]. Vladivostok: FESTU Publ. 2007. 243 p. (rus)
8. Bukin A.V., Patrakov A.N. Determination of concrete strength by methods of destructive and non-destructive testing [Opredelenie prochnosti betona metodami razrushayushchego i nerazrushayushchego kontrolya]. Construction and Geotechnics. 2010. No. 1. Pp. 89–94. (rus)
9. Savin S.N., Danilov I.L. Seismic safety of buildings and structures [Sejsmobeзопасnost' zdaniy i sooruzhenij]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2021. 200 p. (rus)
10. Marazzani J., Cavalagli N., Gusella V. Elastic Properties Estimation of Masonry Walls through the Propagation of Elastic Waves: An Experimental Investigation. Appl. Sci. 2021. 11. 9091. DOI:10.3390/app11199091
11. Savin S., Tsakalidis V. The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction. COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. 5. 2015. Pp. 706–720.

12. Fan Ch.D., Savin D.A. Method for assessing the rigidity characteristics of building structures using flexural waves [Metod opredeleniya zhestkostnykh karakteristik stroitel'nykh konstrukcij s ispol'zovaniem izgibnykh voln]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2022. No. 3 (92). Pp. 28–34. (rus)

13. Fan Ch.D. Assessing of the stone structure strength by the method of using flexural acoustic waves' velocities [Opredelenie prochnosti kamennykh konstrukcij metodom s ispol'zovaniem skorostej izgibnykh akusticheskikh voln]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2022. No. 6 (95). Pp. 21–29. (rus)

14. Recommendations for the survey and assessment of the technical condition of large-panel and stone buildings [Rekomendacii po obsledovaniyu i ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya krupno-panel'nykh i kamennykh zdaniy]. Moscow: TSNIISK named after V. A. Kucherenko, 1988. 57 p. (rus)

15. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. Harmonic oscillations and waves in elastic bodies [Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugih telakh]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 284 p. (rus)

16. Vahid T., Sourav B. Generalized Analytical Dispersion Equations for Guided Rayleigh-Lamb waves and Shear Horizontal (SH) waves in Corrugated Waveguides. International Journal of Solids and Structures. 2020. 202. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2020.05.026

17. Achenbach J.D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam; London: North-Holland PublCo, 1973. 430 p.

18. Viktorov I. Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications: Springer Science+Business Media: New York, NY, USA, 1967. 154 p.

19. Savin S.N. The use of elastic oscillations of various wavelengths to assess the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of

masonry [Ispol'zovanie uprugih kolebanij razlichnykh dlin voln dlya ocenki dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzhenij i prochnosti kamennoj kladki]. Seismic-resistant construction. Building safety. 2017. No. 4. Pp. 43–54. (rus)

20. Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V. Theoretical aspects of the application of Lamb waves in non-destructive diagnostics of layered an isotropic media [Teoreticheskie aspekty primeneniya voln Lemba v nerazrushayushchej diagnostike sloistyh anizotropnykh sred]. Defectoscopy. 2017. No. 4. Pp. 3–21. (rus)

21. Šofer M., Ferfecki P., Šofer P. Numerical solution of Rayleigh-Lamb frequency equation for real, imaginary and complex wavenumbers. Matec web conf. 2018. Vol. 157. DOI:10.1051/matec-conf/201815708011

22. Lu C., Hua J., Wang Z., Lin J. Detection and localization of closely distributed damages via lamb wave sparse reconstruction. Vibroengineering PROCEDIA. 2017. Vol. 14. Pp. 115–119. DOI: 10.21595/vp.2017.19222.

23. Jones R., Facaoaru I. Non-destructive methods of testing concretes [Nerazrushayushchie metody ispytaniy betonov]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 296 p. (rus)

24. Aleshin N.N. Electroseismo-acoustic methods for surveying buildings [Elektrosejsmoakusticheskie metody obsledovaniya zdaniy]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 156 p. (rus)

25. Rytov S.M. Acoustic properties of a finely layered medium [Akusticheskie svoystva melkosloistoy sredy]. Acoustic. Journal. 1964. Vol.10, No. 1. Pp. 16–18. (rus)

26. Brekhovskikh L.M. Waves in Layered Media [Volny v sloistyh sredah]. 2nd ed. M.: Science. 1973. 343 p. (rus)

Phan Ch.D. PhD. E-mail: phanchungduc@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4

Received 20.11.2023

Для цитирования:

Фан Ч.Д. Применение метода с использованием изгибных волн для обследования плитных и стеновых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

For citation:

Phan Ch.D. Application of the bending wave method for inspection of slab and wall structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-54-66

Алсик А.С.М.

Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет

Email: sabdu7751@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЦЕНТРОВ В ЙЕМЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА

Аннотация. Йеменская Республика характеризуется уникальной архитектурой и разнообразием типов зданий, где общественные здания имеют большое значение для экономического и культурного развития общества. Недавние политические события и экономические изменения, наблюдаемые в ближневосточном регионе в целом и в Йеменской Республике в частности, оказали влияние на социальную инфраструктуру и ее роль в обществе: появилась необходимость восстановления разрушенных и строительства новых общественных зданий современных типов с учетом локальной культуры и традиций. Поскольку йеменское общество характеризуется своим разнообразием, обычаями и традициями, формировавшимися на протяжении тысячелетий, дальнейшее развитие типологии общественных зданий в стране необходимо на научной основе в целях обеспечения преемственности с одной стороны, и соответствия международным стандартам качества – с другой. В статье приведены результаты анализа опыта проектирования и строительства современных общественных центров в странах Ближнего Востока, Африки и Азии, выявлены актуальные архитектурные тенденции и на основе этого намечены дальнейшие направления развития типологии общественных зданий в Йеменской Республике. Ожидается, что данная статья внесет свой вклад в обеспечение научных основ для устойчивого развития общественных центров в Йеменской Республике.

Ключевые слова: Йеменская Республика, общественный центр, многофункциональность, архитектурно-планировочные решения, туризм, население, мировой опыт.

Введение. Йеменская Республика (далее Йемен), расположенная на юго-западе Аравийского полуострова, является одной из самых древних стран, обладающих богатой историей. Культурное наследие Йемена формировалось на протяжении тысячелетий: оно включает в себя древние города, архитектурные шедевры и традиционную культуру. Однако в связи с политическими и социальными трудностями последних лет, развитие социально-культурной инфраструктуры в стране было ограничено. Создание современных многофункциональных общественных центров в Йемене с обеспечением преемственности их исторических аналогов представляет собой важный шаг в направлении восстановления и дальнейшего развития инфраструктуры страны. [1] Таким образом, объектом исследования являются многофункциональные общественные центры в социально-культурном контексте Йемена. Целью статьи является исследование перспектив развития общественных центров в Йемене с учетом традиционного уклада общества и современных тенденций в мировом опыте. К задачам статьи относятся определение функциональной направленности общественных центров наиболее актуальных для развития в Йемене и затем анализ мирового опыта проектирования и строительства общественных центров с данными функциями в странах Ближнего Востока, Африки и Азии, которые по социально-культурному развитию и

климатическим условиям наиболее близки Йемену – выявление актуальных тенденций для их последующего внедрения в современную типологию общественных зданий Йемена.

Многофункциональный общественный центр отличает наличие нескольких взаимодополняющих функций, которые помогают функционированию друг друга. Тем самым увеличивается посещаемость комплекса и расширяется совокупность его посетителей. В небольших населённых пунктах многофункциональность обусловлена, во многом, экономической целесообразностью [2]. Создание единого общественного центра с выполнением нескольких функций одновременно или поочередно меньше по затратам, чем строительство нескольких специализированных центров. Многофункциональные общественные центры – это места, где люди могут собираться, общаться, получать образование и доступ к различным услугам, работать, отдыхать, решать различные социальные потребности. Они играют важную роль в формировании социального капитала и способствуют укреплению общественных связей [3, 4].

В Йемене такие центры имеют большое значение, поскольку они способствуют созданию сообщества, объединению людей разных возрастов и культур в одном месте. Однако, несмотря на значимость многофункциональных общественных центров, их развитие в Йемене сталкивается

с рядом проблем и вызовов. Политическая нестабильность, отсутствие финансирования и ограниченные ресурсы являются главными факторами, мешающими развитию этих центров. Необходимо прилагать усилия в направлении поддержки социально-культурной инфраструктуры Йемена, обеспечивая не только финансирование, но и экспертную помощь, обмен знаниями и опытом с другими странами.

Методы, оборудование, материалы. Научной базой исследования послужили труды А.Л. Гельфонд, А.В. Меренкова, А.Ф. Еремеевой, Н.А. Улинич, раскрывающие проблемы проектирования современных многофункциональных общественных комплексов, в том числе в малых городах и поселениях, а также труды исследователей из Йемена. Йеменский совет по развитию подготовил доклад о роли социальных центров в развитии Йемена [5], помимо этого ряд исследователей изучали различные аспекты социальной жизни в Йемене. Например, Аль-Ахдаль исследовал конфликт и гуманитарный кризис в Йемене [6], кандидатская диссертация Мохаммед Хамуд Ахмед Касема посвящена исследованию традиций и современных характеристик в архитектуре городского жилья в Йемене, Аднан Абдо Аль Сельви исследовал социокультурные факторы в формировании пространственных структур исторического поселения Йемена, чему посвящена его кандидатская диссертация, в которой он рассматривал социальные и исторические аспекты в жизни общества Йемена [7]. Изучение возможностей развития типологии общественных зданий в Йемене и их роли в улучшении социальной жизни населения является одной из тем, которая еще недостаточно изучена с научной точки зрения, что свидетельствует об актуальности данной статьи.

Автор статьи обращается к научным и библиографическим источникам по теме традиционных функций для общества Йемена и их влиянии на архитектуру, проводит параллели с современными аналогами данных функций, в результате чего делает основные выводы о ключевых направлениях развития социально-культурной инфраструктуры страны. Затем автор обращается к анализу опыта проектирования многофункциональных общественных центров различных типов, включающих выше обозначенные функции, преимущественно в городах стран, среда которых близка по социально-культурному развитию городам Йемена. Предметами изучения при этом являются функциональные, архитектурно-планировочные и объемно-пространственные решения зданий. Выявленные современные тенденции в архитектуре многофункциональных обществен-

ных центров предлагается в последующем внедрить в новую типологию общественных центров Йемена.

Основная часть.

Направления развития социально-культурной инфраструктуры Йемена. В результате исследования существующего социально-экономического положения городов Йемена сделан вывод, что в стране необходимо развивать несколько типов многофункциональных комплексов.

Одной из главных необходимых направлений формирования общественных центров в Йемене является обеспечение доступа к образованию. В условиях, когда система образования в стране испытывает трудности, эти центры предоставляют дополнительные возможности для обучения детей и взрослых. Здесь организуются курсы и тренинги, предлагаются различные образовательные программы, включая компьютерные навыки, чтение и письмо, иностранные языки и другие предметы. Это помогает повысить образовательный уровень населения и расширить кругозор жителей Йемена. Образовательные центры: это учреждения, которые предлагают образовательные программы и услуги для различных возрастных групп. Это могут быть университетские комплексы, библиотеки, центры дополнительного образования и технических навыков [8].

Другая важная функция многофункциональных общественных центров - это поддержка культурного разнообразия и популяризация национального наследия. В Йемене богатое культурное наследие, включая традиционную музыку, танцы, ремесла и народное искусство. Общественные центры предоставляют площадку для проведения культурных мероприятий, выставок, концертов и фестивалей. Это способствует сохранению и продвижению уникальной культурной идентичности Йемена, а также способствует развитию туризма и привлечению внимания международного сообщества. Культурные центры - это учреждения, которые предоставляют разнообразные культурные услуги и активности, такие как концерты, театральные представления, выставки и мастер-классы. Культурные центры могут включать в себя концертные залы, театры, галереи и многое другое [5].

Традиционные ремесла в Йемене имеют богатую историю, отражая богатство культурного наследия этой страны. Эти ремесла являются важной частью культурного и экономического жизненного образа многих

людей в Йемене, каждое из которых связано с уникальными навыками и культурными традициями: изготовление ковров вручную, керамика, изготовление металлических изделий: изготовление ювелирных изделий, ткачество, обработка кожи, изготовление деревянных изделий (шкатулки, сундуки, мебель, декор), изготовление кованых железных изделий: кузнецы в Йемене мастерски куят железо, создавая разнообразные предметы, включая светильники, решётки и мебель, изготовление масок и театральных костюмов для традиционных праздников и представлений. Эти традиционные ремесла отражают богатство культурного разнообразия и традиций в Йемене. Они также играют важную роль в сохранении национальной идентичности и предоставляют местным мастерам и ремесленникам возможность продолжать свою работу и передавать свои умения следующим поколениям. Эти традиционные ремесла не только сохраняют богатое культурное наследие Йемена, но и имеют экономическое значение, предоставляя местным жителям возможность заработка на жизнь. Однако, как и во многих других странах, традиционные ремесла в Йемене сталкиваются с вызовами, связанными с современными технологиями и изменяющимися рыночными условиями. Важно поддерживать и сохранять эти ремесла, чтобы продолжить передавать их богатство и красоту будущим поколениям. Возможно формирование современных ремесленных центров для поддержки и популяризации традиционных ремесел Йемена наряду с формированием деловых центров – многоцелевых зданий, включающих в себя выставочные залы, конференц-залы, торговые площади, рестораны и другие пространства для культурных и деловых мероприятий [9].

Рынки и базары. Рынки и базары являются неотъемлемой частью культурной и экономической жизни Йемена. Они представляют собой места, где местные жители торгуют традиционными товарами, свежими продуктами, специями, текстилем, ювелирными украшениями и другими товарами. Рынки и базары в Йемене обычно очень живописны и ароматны, и они являются важными центрами обмена опытом и культурного обогащения. Помимо этого, на рынках и базарах в Йемене часто проводятся социокультурные события, такие как музыкальные выступления, театральные представления и мероприятия, связанные с национальными праздниками. Это создает атмосферу праздника и обогащает культурный опыт посетителей. В крупных городах стран Востока постепенно появляются

крупные торговые комплексы, которые помимо магазинов также включают рестораны, кинотеатры и другие развлекательные объекты. Они предлагают широкий спектр услуг и мероприятий для посетителей. Тем не менее, не надо забывать, что рынки и базары являются важными инструментами в сохранении и передаче традиций и культурных ценностей Йемена. Здесь молодое поколение может учиться понимать ценность своего культурного наследия [6].

Йемен привлекает туристов своим уникальным историческим наследием, невероятными природными красотами, традиционной восточной культурой. В туристических, в особенности прибрежных зонах, возможно появление рекреационных комплексов – объектов, предназначенных для отдыха и развлечений. Это могут быть парки с развлекательными аттракционами, аквапарки, спортивные комплексы с бассейнами, тренажерными залами и другими спортивными сооружениями.

Многофункциональные общественные центры могут предлагать широкий спектр социальных услуг, таких как медицинская помощь, консультации, поддержка семей, профессиональное обучение и трудоустройство. Эти центры становятся центральными точками для развития социальной инфраструктуры, предоставляющей необходимые услуги и поддержку всем слоям населения.

Согласно данным направлениям рассмотрены аналоги многофункциональных общественных комплексов.

Анализ архитектурных решений многофункциональных общественных центров из мирового опыта. Многофункциональные общественные центры играют главную роль в развитии инфраструктуры многих стран. Вот некоторые международные аналоги таких центров

1. Культурный центр Западного Сингаванга, Индонезия (рис. 1).

Для анализа опыта строительства общественных зданий была выбрана Республика Индонезия, расположенная в Юго-Восточной Азии, со столицей в Джакарте и четвертой по численности населения страной с мусульманским большинством. Рассматриваемый объект находится в Сингаванге - небольшом городе на западе Индонезии. Многофункциональный общественный центр представляет собой культурный центр площадью 1972 м², спроектированный архитекторами Патриком Лимом и Хенди Лимом в 2017 году – это реконструкция бывшего кинотеатра.

Город Сингаванг отличается разнообразием населения, что отражается на разнообразии

его культуры и искусства, здесь ежегодно проводится ряд мероприятий, таких как фестиваль ngabayon, но самым крупным и известным событием, на которое приезжают со всего мира, является национальный фестиваль [10].

Многофункциональный культурный центр является важным общественным центром и стал центром развития и продвижения культуры и искусства в городе. Он характеризуется уникальным архитектурным дизайном, отражающим культуру города. В отделке использован местный

кирпич, содержащий оксид железа, придающий материалу характерный розово-оранжево-красный цвет, и каолинит, добавляющий белый оттенок. В функции культурного центра входят выставочное пространство, творческие мастерские, залы для культурных мероприятий и встреч. Авторы проекта и местные власти ставили задачу отобразить в культурном центре район Сингаванг в сжатом виде. Появление центра оказало положительное влияние на экономическое развитие и культуру городского сообщества.

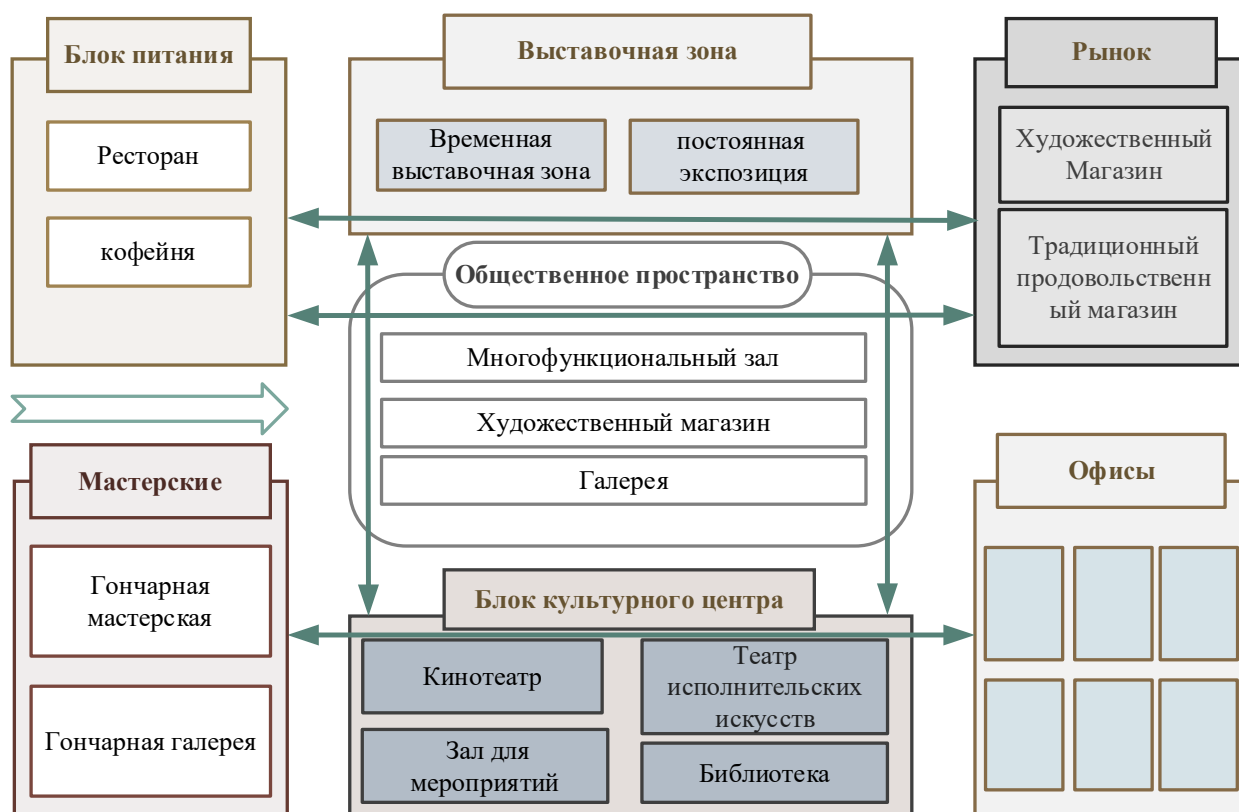
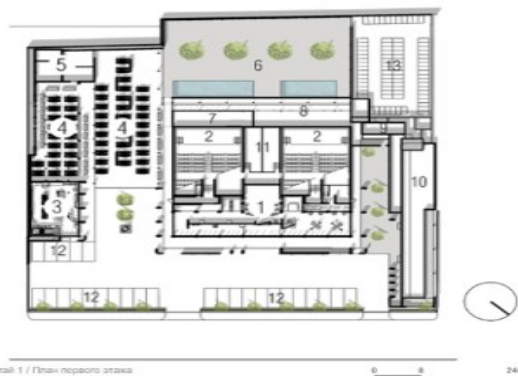


Рис. 1. Культурный центр Западного Сингаванга, Индонезия

2. Культурный центр Давар Эль-Эзба, Каир, Египет (рис. 2).

Культурный центр Давар Эль-Эзба расположен в г. Каир – столице Республики Египет, которая считается одной из древнейших цивилизаций в мире, в районе Эзбет Хайраллах и занимает площадь 350 м². Проект был разработан архитектором Ахмедом Хоссамом Саафаном в 2021 году.

Район Эзбет Хайраллах известен большим количеством трущоб, население которых составляет порядка 700000 человек. Культурный центр Давар Эль-Эзба стал уникальным зданием, с которого начались положительные изменения в районе. Культурный центр предназначен, прежде всего, для повышения уровня образования людей, живущих в трущобах, и включает место для

проведения собраний, творческие мастерские и административный офис.

Вслед за появлением культурного центра Давар Эль-Эзба начались преобразования городской среды района Эзбет Хайраллах в целях повышения качества жизни жителей района, которые внесли свой вклад и приняли участие в создании проекта. Проект обновленного уличного пространства представляет собой место для встреч жителей, проведения мероприятий, обмена традициями, обычаями и опытом.

Улицы были отреставрированы, восстановлены фасады, отремонтировано дорожное покрытие, озеленение и освещение, отремонтирована

многофункциональная детская площадка, стены домов окрашены в нетрадиционные цвета, благодаря чему улица функционирует как многофункциональный общественный центр для встреч и проведения досуга, который может стать крупным пространством для проведения массовых мероприятий под открытым небом [11].

Результаты проекта оказались положительное влияние на сообщество во всех культурных, эстетических, экономических и экологических аспектах, а улица стала оживленной средой, свободной от преступности и примером для подражания во всех отношениях.

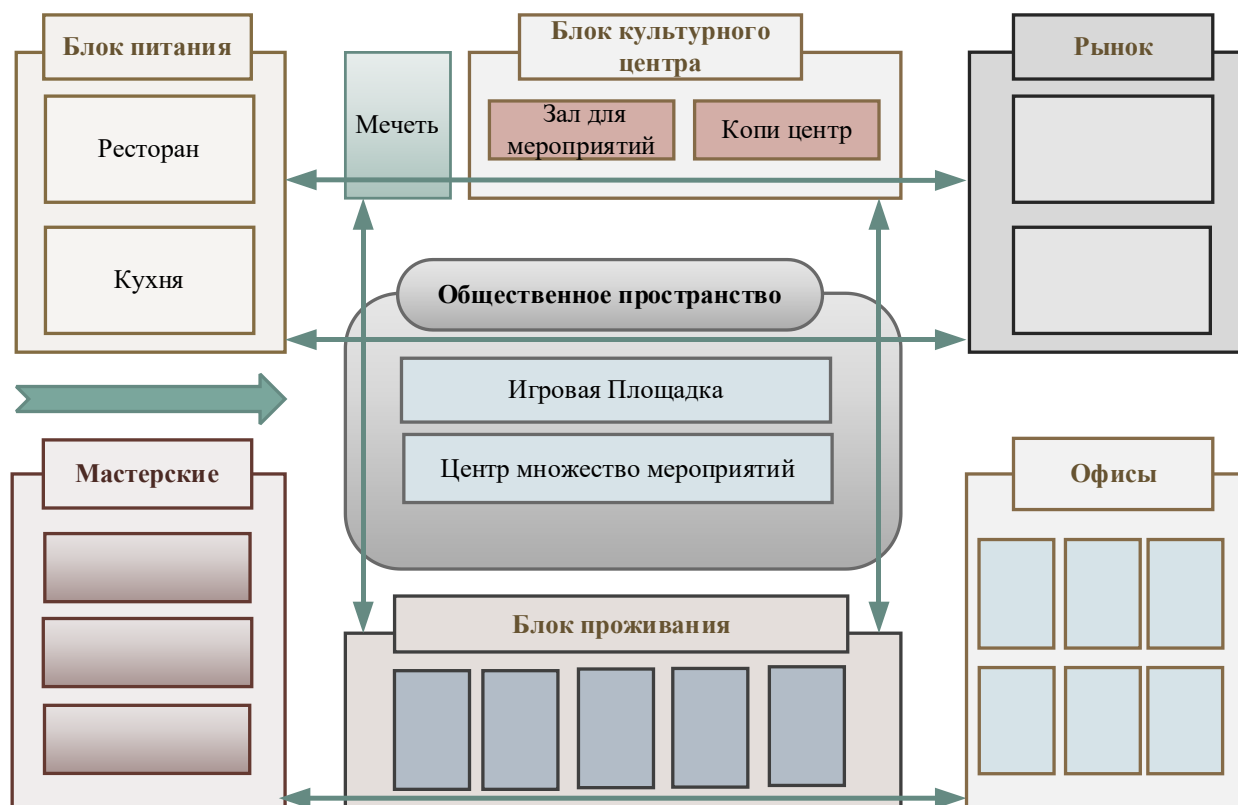
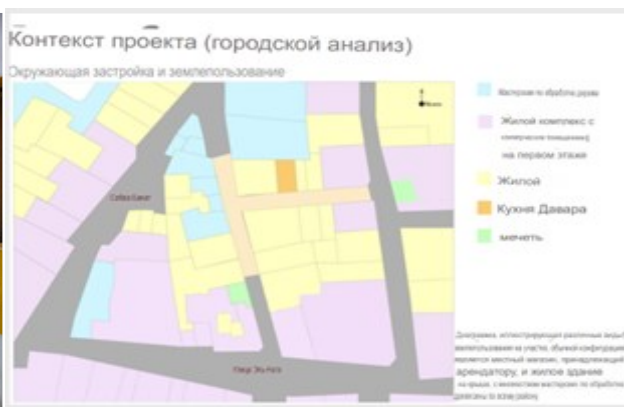


Рис. 2. Культурный центр Давар Эль-Эзба, Каир, Египет

3. Деловой центр в Ливии (рис. 3).

Центр расположен в городе Триполи в Ливии, арабской стране в Северной Африке площадью 1,8 млн. кв. км, стране с большими нефтяными и экономическими запасами, 95 % площади

которой занимает пустыня. Это уникальный в своем роде центр в стране площадью 25 000 м², построенный в 2010 г. рядом с лесом, отелями, зоопарком, детской площадкой и частными виллами, так что центр послужил отправной точкой

для развития этого района в экономическом, городском, культурном и туристическом плане.

Дизайн здания также символизирует открытость миру, поэтому оно является центром встреч высокопоставленных лиц и президентов со всего мира в естественной среде и предметом гордости нации, которую оно представляет. При проектировании здания использовались новейшие современные и технологические средства, отвечающие его назначению, сохраняющие окружающую среду и заботящиеся о ландшафте при проектировании, чтобы это здание отражало культуру общества и отвечало своему местоположению с точки зрения природных ресурсов и культурного наследия. [12]

Здание состоит из нескольких залов, конференц-залов, VIP-салонов, журналистских комнат, частных комнат, в которых также имеется VIP-вход, есть также два дополнительных средних конференц-зала, рестораны и административные помещения.

Здание современно, имеет ослепительный дизайн, находится в гармонии с окружающей средой и прекрасно использует природные ресурсы, такие как дневной свет, зеленые насаждения и водные элементы, и все это положительно отражается на ливийском обществе во всех политических, экономических, туристических и культурных аспектах [13].

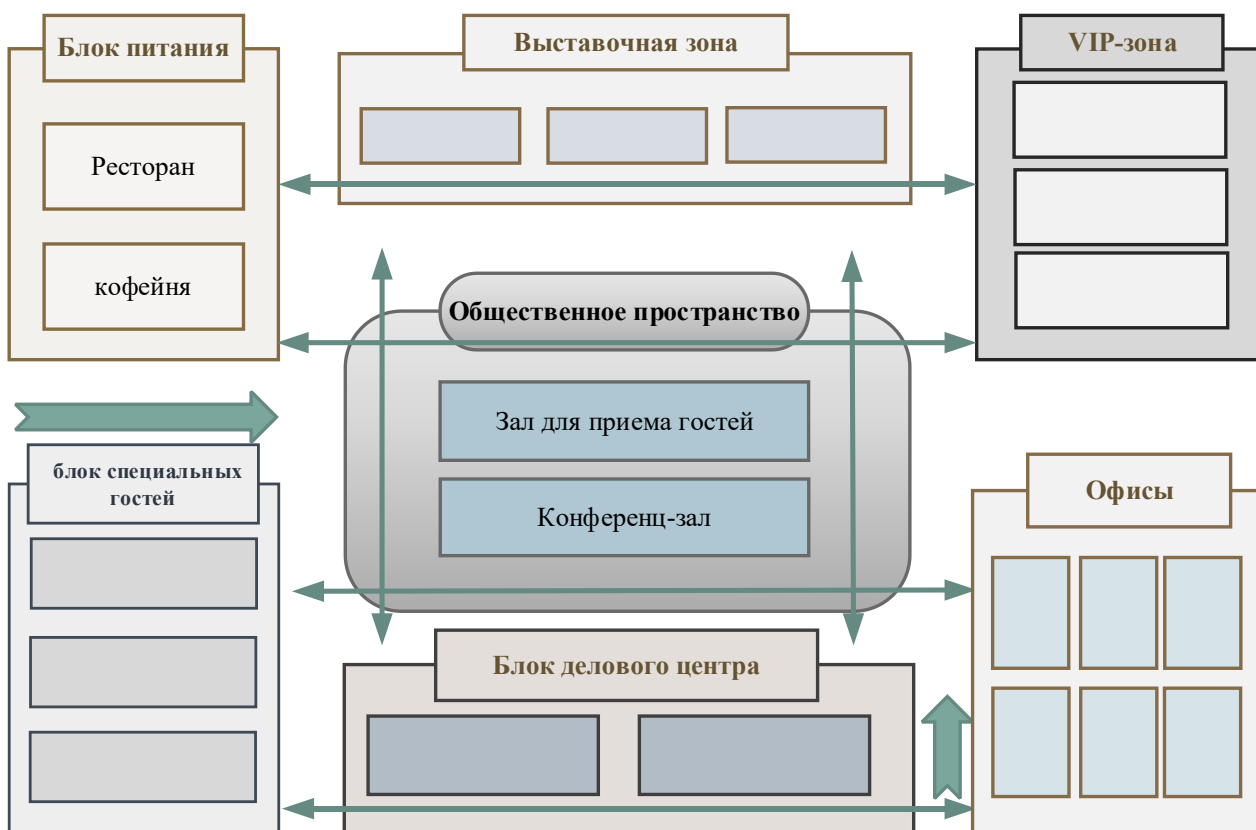


Рис. 3. Деловой центр в Ливии

4. Досуговой и учебно-спортивный центр в Руанде (рис. 4).

Центр расположен на холмах Руанды вблизи сельской деревни Масоро. Руанда – африканская страна, не имеющая выхода к морю, с высокой

географической природой, ее столица – Кигали, это одна из самых маленьких стран Африки по площади – 26 338 км² с населением 12,6 млн человек и самой большой плотностью населения в Африке, она является одной из ведущих стран в экономическом отношении в последние годы и считается страной с характерным культурным разнообразием [14].

Центр площадью 1100 м² был построен в 2022 году и включает в себя библиотеку, учебные классы, кабинеты технологии, крытый и открытый спортивные залы, баскетбольные площадки

и футбольное поле, которые доступны всем членам общины бесплатно.

Проект был разработан с помощью местных строителей и состоит из крытых и открытых помещений, объединенных вместе, чтобы создать подходящую среду для обучения, отдыха и здоровья, где центр работает для обеспечения основных медицинских потребностей сообщества, а библиотека также доступна для всех желающих, чтобы они могли продолжить обучение, когда школы закрыты [15].

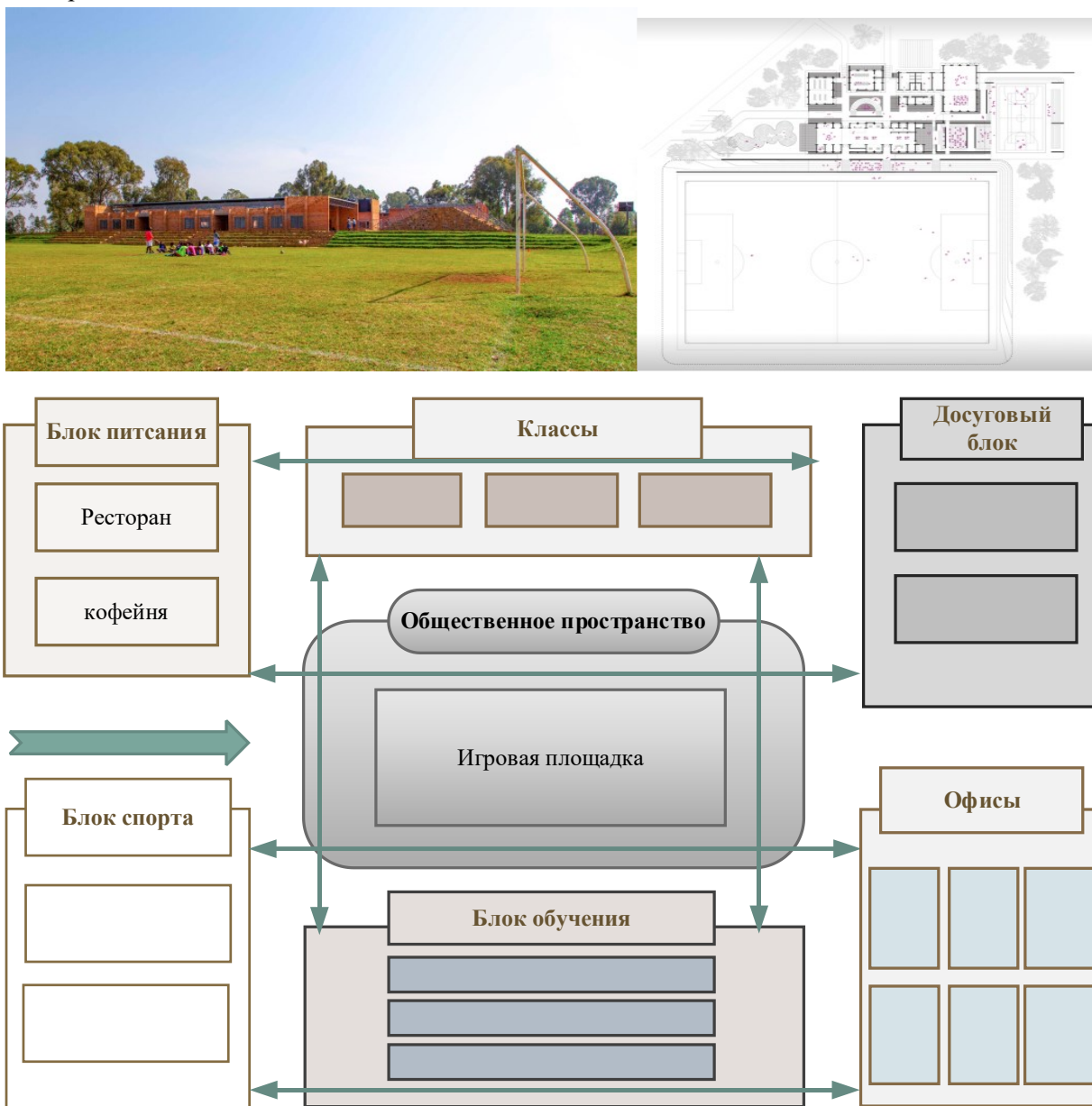


Рис. 4. Досуговой и учебно-спортивный центр в Руанде

5. Досуговой центр "Женский дом Улед Мерзуг" в Идельсане, Марокко (рис. 5).

Центр расположен в деревне Оулед Мерзук, расположенной недалеко от Атласских гор в Марокко. Марокко – страна на северо-западе Африки с многочисленными культурами, такими

как исламская, амазигская и сахарская. Площадь центра составляет 130 м², он был построен в 2019 году. Женский дом – это центр для сбора женщин, обмена опытом, ремесел, развлечений и проведения различных мероприятий. Проект ре-

ализован с использованием натуральных материалов и с помощью местных мастеров. Важность этого проекта заключается в акцентировании роли женщины в обществе и сохранении обычаев, традиций и ремёсел [16].

Здание возвышается над деревней, куда ведут две дороги. Здание состоит из двух частей, соединённых с центром. Центр включает мастерскую, дамскую портновскую, пекарню, место встречи, выставку, где продаётся хлеб и остальные вещи [17].

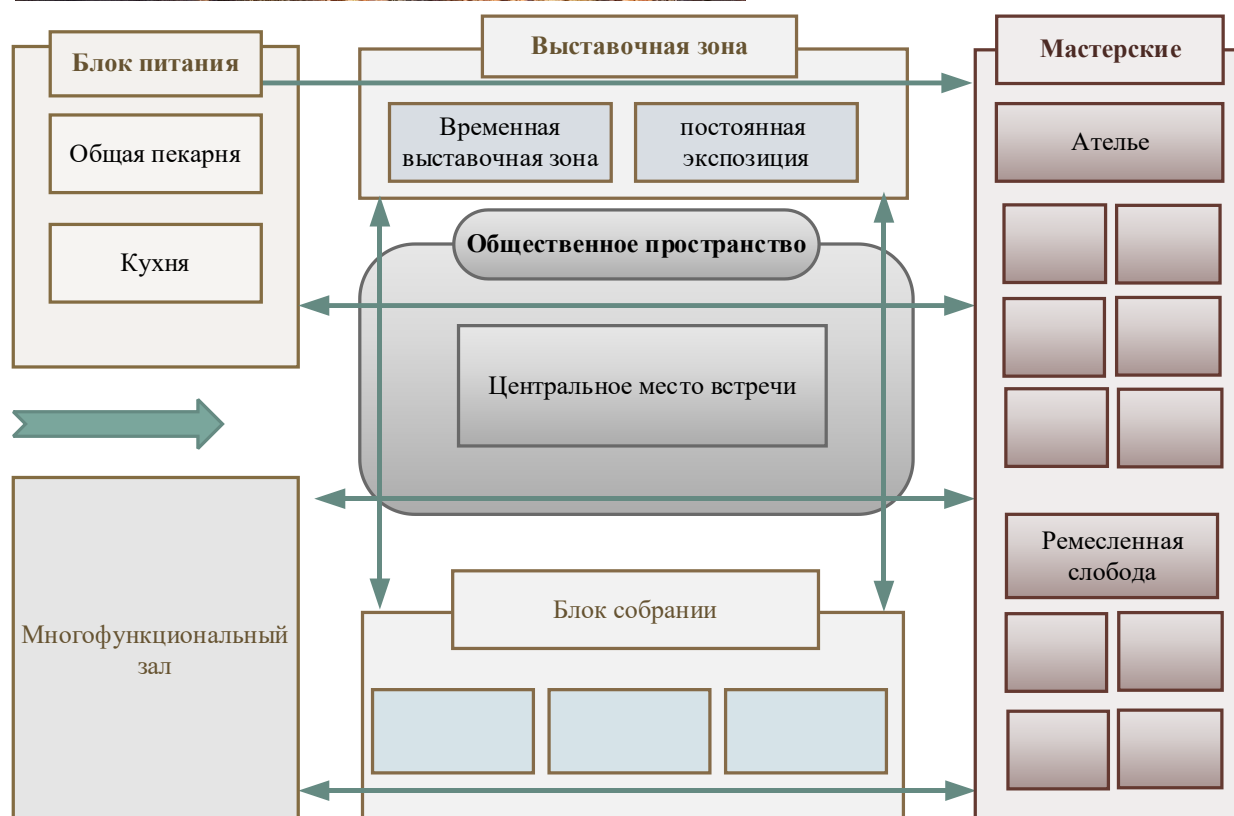


Рис. 5. Досуговой центр "Женский дом Улед Мерзуг" в Идельсоне, Марокко

6. Религиозный образовательный центр, Катарский исламский факультет и мечеть «Города образования» (рис. 6).

Центр находится в государстве Катар - арабской стране, расположенной на юго-западе Азии, имеющей небольшую площадь, высокий уровень доходов, обладающей очень сильной экономикой и огромными экономическими резервами. Проект был основан в 2015 году в катарском городе Доха с целью создания новой концепции ислама в условиях "негативного образа исламского образования". При этом связь между верой и знанием

выражена в многоступенчатой схеме, соединяющей одновременно территорию колледжа и мечети. Здание возвышается на пяти колоннах: они символизируют пять столпов ислама и покрыты хадисами из Корана на соответствующие темы. Под зданием также создано затенённое пространство, ведущее к главному входу в колледж [18].

Центр расположен на юге, в нем находятся библиотека, учебные классы и кабинеты преподавателей, а его минареты поднимаются с запада на высоту 90 метров, символизируя науку и свет. Таким образом, QSC имеет религиозное и куль-

турное значение для общества, помимо эстетической ценности, которая привлекает посетителей со всего мира.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ функциональных особенностей современных общественных центров стран Востока и Северной Африки.

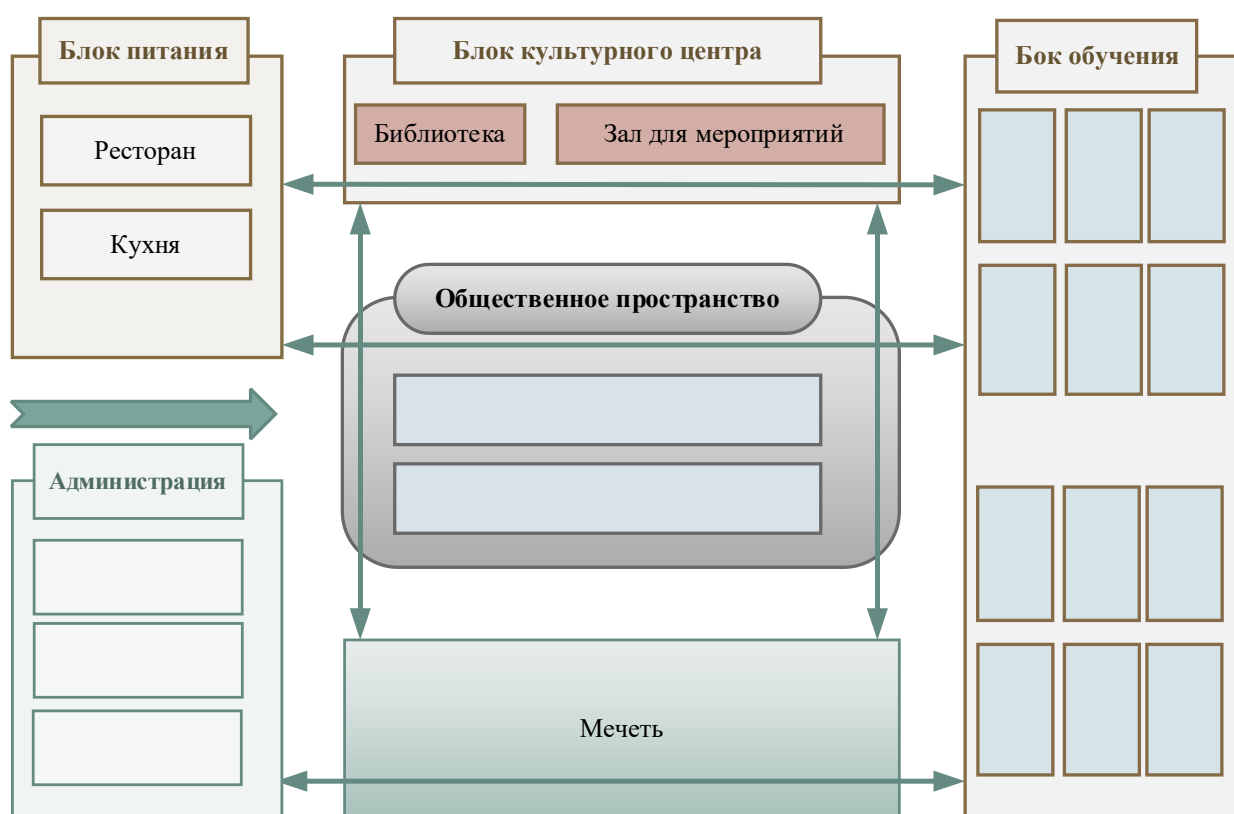


Рис. 6. Религиозный образованный центр, Катарский исламский факультет и мечеть «Города образования»

Выводы. Анализ мирового опыта формирования многофункциональных общественных центров в странах Востока позволяет сформировать качественно новые сценарии для развития социально-культурной инфраструктуры Йемена:

1. Улучшение доступности культурных мероприятий и услуг: Многофункциональные общественные центры предоставляют уникальную возможность для развития и доступности культурных мероприятий, таких как выставки, концерты, театральные постановки и танцевальные выступления. Эти центры становятся местом встречи местного сообщества, способствуя обмену и сохранению культурных традиций и ценностей.

2. Развитие современных образовательных программ: Общественные центры могут предлагать различные образовательные программы, включая курсы по повышению профессиональных навыков, языковые курсы и программы повышения грамотности. Это поможет улучшить уровень образования в сельских поселениях и расширить возможности жителей для саморазвития и самообразования.

3. Предоставление социальных услуг и поддержка: Многофункциональные общественные центры могут стать центром, предоставляющим различные социальные услуги, такие как консультации по здоровью, поддержка семей и консультирование по

социальным вопросам. Это особенно важно для сельских поселений, где доступ к таким услугам может быть ограничен.

4. Спортивные и рекреационные возможности: Многофункциональные общественные центры могут предлагать спортивные площадки, залы для тренировок и другие места для активного отдыха. Это поможет стимулировать физическую активность и здоровый образ жизни в сельских поселениях, а также способствовать формированию здорового и солидарного сообщества.

5. Содействие экономическому развитию: Многофункциональные общественные центры могут стать площадкой для развития местного предпринимательства и рынков. Они могут предоставлять возможность для создания местных ремесленных искусственных мастерских, магазинов сельскохозяйственных продуктов и других предприятий, что способствует экономическому развитию сельских поселений.

Таблица 1

Сравнительный анализ функциональных особенностей современных общественных центров стран Востока и Северной Африки

Название центра	Общая площадь	Основные функции	Дополнительные функции	Категории посетителей
Культурный центр Западного Сингаванга	1972 м ²	Культурные мероприятия	Выставочные залы, театр, концерт	Любители искусства, туристы
Культурный центр Давар Эль-Эзба, Каир, Египет	350 м ²	Культурные мероприятия, выставки	Образование, досуг, встречи	Жители местной общины
Деловой центр, Ливия	25000 м ²	Деловые мероприятия, конференция	Офисы, Коммерческие зоны	Бизнес-партнеры, участники конференций
Досуговой и учебно-спортивный центр, Руанда	1100 м ²	Учеба спорт, развлечения	Фитнес, игры, учебные классы	Местное сообщество, спортсмены
Досуговой центр «Женский дом Улед Мерзуг» в Идельсоне, Марокко	130 м ²	Образование, творчество женщин	Рукоделие, консультации	Женщины в поиске поддержки
Религиозный образованный центр, Катарский исламский факультет и мечеть «Города образования»	14 000 000 м ²	Религиозное образование, религиозная практика	Туризм	Верующие, преподаватели, студенты и их семьи

Помимо этого, рассмотренные аналоги служат примерами того, как через архитектурные решения общественных центров передается идентификация территории района или города. Это выражается в объемно-пространственном решении, дизайне фасадов здания и прилегающего общественного пространства, применении местных отделочных материалов (культурный центр Западного Сингаванга, досуговой и учебно-спортивный центр в Руанде, досуговой центр "Женский дом Улед Мерзуг" в Идельсоне). С другой стороны, архитектура общественных центров может быть новаторской с применением современных технологий,

символизирующих будущее и прогресс (деловой центр в Ливии, религиозный образованный центр, Катарский исламский факультет и мечеть «Города образования»).

Развитие многофункциональных общественных центров должно быть приоритетным направлением в развитии городских и сельских поселений Йемена, так как они способны значительно улучшить качество жизни местного населения и способствовать устойчивому развитию региона.

Необходим системный подход к развитию общественных центров в Йемене, который вклю-

чает проведение классификации городов и поселений Йемена с выявлением специфики их геополитического и экономического положения, специализации трудовой занятости населения, существующего развития социальных функций. Это даст возможность связать типологию многофункциональных общественных центров с их локализацией в стране, выявив наиболее перспективные сочетания функций в общественных центрах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алсих А.С.М. Туризм в Йеменской Республике: перспективы развития инфраструктуры // Инженерное дело: Материалы III Международной научно-практической конференции в рамках 20-й Международной научно-технической конференции БНТУ "Наука – образованию, производству и экономике" 01-02 декабря 2022 г. Минск: БНТУ. 2022. С. 24-27.
2. Улинич Н.А. Многофункциональная архитектура в контексте сельских общественных пространств // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 1(42). С. 150–162.
3. Гельфонд А.Л. Общественное здание и общественное пространство. Дуализм отношений // Academia. Архитектура и строительство. 2015. №2. С. 18–31.
4. Еремеева А.Ф. Общественные пространства в структуре многофункционального комплекса: современные тенденции организации // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 5–12. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12
5. Yemen Development Council. Report on the Role of Social Centers in Yemen's Development Landscape. Sana'a // Yemen Publishing House. 2022.
6. Al-Ahdal A., Zaidi S. Conflict and humanitarian crisis in Yemen // International Journal of Community Medicine and Public Health. 2018. № 5(7). Pp. 3074–3077.
7. Аль Сельви Аднан Абдо. Влияние этнокультурных традиций на формирование кварталов г. Сана (столица Йемена) // Научный журнал: Вестник ИргТУ. 2012. № 8 (67). С. 86–92.
8. Smith D.A., Johnson M.L. Social centers and community development in conflict zones: lessons from international case studies // Journal of Conflict Resolution. 2020. №45 (3). Pp. 321–340.
9. Abdou H.A., Al-Dubai M.H., Abdou R.A. The role of social centers in developing societies: a comparative study // International Journal of Innovation, Creativity and Change, 2020. №9(8). Pp. 201–220.
10. Al-Wadei S. The role of youth in building and strengthening civil society in Yemen // Mediterranean Journal of Social Sciences. 2017. № 8(5). Pp. 139–148.
11. Al-Mihlafi A.S. The impact of conflict on education in Yemen // Journal of Education and Practice. 2018. № 9(24). Pp. 8–15.
12. Гарибова О. Архитектурное проектирование общественных центров: мировой опыт и тенденции // Архитектура и дизайн. 2020. №25(3). С. 45–56.
13. Смирнов В. Экологически устойчивая архитектура общественных зданий: лучшие практики // Journal of Sustainable Architecture. 2017. №10(1). С. 32–44.
14. Saleh A.A. Prospects for the development of community centers in the Republic of Yemen based on the world experience // Journal of Social Development. 2022. № 55(4). Pp. 421–440.
15. Алсих. А.С.М. Основы формирования комплекса делового туризма со спортивной функцией в городе Эль-Мукалла (Йеменская Республика) // Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Том 6. 2021. С. 218–220.
16. Abdelkafi M.R. Effectiveness of community centers in Yemen: analysis of world models // Journal of International Studies. 2023. №28(2). Pp. 189–208.
17. Hussein S.A. Community centers and peace-building in Yemen: experience of other countries // Development and Peace. 2021. №37(1). Pp. 78–96.
18. Алсих. А.С.М. Направления формирования современных гостиниц в Йеменской Республике на основе анализа мирового опыта // Материалы VII Международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. С. 163–167.

Информация об авторах

Алсих Абдулсалам Салех Муайд, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: sabdu7751@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 14.09.2023 г.

© Алсих А.С.М., 2023

Alseh A.S.M.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: sabdu7751@gmail.com*

PROSPECT FOR THE DEVELOPMENT OF PUBLIC CENTERS IN THE REPUBLIC OF YEMEN. ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE

Abstract. *The Republic of Yemen is characterized by a unique architecture and a variety of building types, where public buildings are of great importance for the economic and cultural development of society. Recent political events and economic changes observed in the Middle East region in general and in the Republic of Yemen in particular have had an impact on social infrastructure and its role in society: there is a need to restore destroyed and build new public buildings of modern types, taking into account local culture and traditions. Since Yemeni society is characterized by its diversity, customs and traditions that have been formed over thousands of years, further development of the typology of public buildings in the country is necessary on a scientific basis in order to ensure continuity on the one hand, and compliance with international quality standards on the other. The article presents the results of the analysis of the experience of designing and building modern public centers in the Middle East, Africa and Asia. Current architectural trends are identified and, based on this, further directions for the development of the typology of public buildings in the Republic of Yemen are outlined. It is expected that this article will contribute to providing a scientific basis for the sustainable development of community centers in the Republic of Yemen.*

Keywords: *Republic of Yemen, public center, multifunctionality, architectural and planning solutions, tourism, population, world experience.*

REFERENCES

1. Alseh A.S.M. Tourism in the Republic of Yemen: prospects for infrastructure development [Turizm v Jemenskoj Respublike: perspektivy razvitiya infrastruktury]. Engineering: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference within the framework of the 20th International Scientific and Technical Conference BNTU "Science - education, production and economy" 01-02 December 2022 Minsk: BNTU. 2022. Pp. 24–27. (rus)
2. Ulinich N.A. Multifunctional architecture in the context of rural public spaces [Mnogofunkcional'naya arhitektura v kontekste sel'skih obshchestvennyh prostranstv]. Architecture and modern information technologies. 2018. No. 1(42). Pp. 150–162. (rus)
3. Gelfond A.L. Public building and public space. Relationship dualism [Obshchestvennoe zdanie i obshchestvennoe prostranstvo. Dualizm otnoshenij]. Academia. Архитектура и строительство. 2015. No. 2. Pp. 18–31. (rus)
4. Ereemeeva A.F. Public spaces in the structure of a multifunctional complex: modern trends of organization [Obshchestvennye prostranstva v strukture mnogofunkcional'nogo kompleksa: sovremennye tendencii organizacii]. Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 4 (81). Pp. 5–12. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12 (rus)
5. Yemen Development Council. Report on the Role of Social Centers in Yemen's Development Landscape. Sana'a. Yemen Publishing House. 2022.
6. Al-Ahdal A., Zaidi S. Conflict and humanitarian crisis in Yemen. International Journal of Community Medicine and Public Health. 2018. No. 5(7). Pp. 3074–3077.
7. Al' Sel'vi Adnan Abdo. The influence of ethno-cultural traditions on the formation of the quarters of Sanaa (the capital of Yemen) [Vliyanie etnokul'turnyh tradicij na formirovanie kvartalov g. Sana (stolica Jemena)]. Scientific journal: Bulletin of IrSTU. 2012. No. 8 (67). Pp. 86–92.
8. Smith D.A., Johnson M.L. Social centers and community development in conflict zones: lessons from international case studies. Journal of Conflict Resolution. 2020. No. 45 (3). Pp. 321–340.
9. Abdou H.A., Al-Dubai M.H., Abdou R.A. The role of social centers in developing societies: a comparative study. International Journal of Innovation, Creativity and Change, 2020. No. 9(8). Pp. 201–220.
10. Al-Wadei S. The role of youth in building and strengthening civil society in Yemen. Mediterranean Journal of Social Sciences. 2017. No. 8(5). Pp. 139–148.
11. Al-Mihlafi A.S. The impact of conflict on education in Yemen. Journal of Education and Practice. 2018. No. 9(24). Pp. 8–15.
12. Garibova O. Architectural design of public centers: world experience and trends [Arhitekturnoe proektirovanie obshchestvennyh centrov: mirovoj opyt i tendencii]. Journal of Architecture and Design. 2020. No. 25(3). Pp. 45–56. (rus)
13. Smirnov V. Environmentally sustainable architecture of public buildings: best practices

[Ekologicheski ustojchivaya arhitektura obshchestvennyh zdaniy: luchshie praktiki]. Journal of Sustainable Architecture. 2017. No. 10(1). Pp. 32–44. (rus)

14. Saleh A.A. Prospects for the development of community centers in the Republic of Yemen based on the world experience. Journal of Social Development. 2022. No. 55(4). Pp. 421–440.

15. Alseh A.S.M. Fundamentals of formation of business tourism complex with sports function in the city of El-Mukalla (Yemen Republic) [Osnovy formirovaniya kompleksa delovogo turizma so sportivnoj funkciej v gorode El'-Mukalla (Jemenskaya Respublika)]. Actual problems of subsoil use. Theses of reports of XIX All-Russian conference-competition of students and graduate students. Vol. 6. 2021. Pp. 218–220. (rus)

16. Abdelkafi M.R. Effectiveness of community centers in Yemen: analysis of world models. Journal of International Studies. 2023. No. 28(2). Pp. 189–208.

17. Hussein S.A. Community centers and peace-building in Yemen: experience of other countries. Development and Peace. 2021. No. 37(1). Pp. 78–96.

18. Alseh. A.S.M. Directions for the formation of modern hotels in the Republic of Yemen based on the analysis of world experience [Napravleniya formirovaniya sovremennyh gostinic v Jemenskoj Respublike na osnove analiza mirovogo opyta]. Materials of the VII International full-time scientific-practical conference of young scientists and students in the Donbas National Academy of Construction and Architecture. 2023. Pp. 163–167. (rus)

Information about the authors

Alseh, Abdulsalam S. M. Postgraduate student. E-mail: sabdu7751@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Received 14.09.2023

Для цитирования:

Алсех А.С.М. Перспективы развития общественных центров в Йеменской Республике. Анализ мирового опыта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 54–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-54-66

For citation:

Alseh A.S.M. Prospect for the development of public centers in the Republic of Yemen. Analysis of world experience. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 54–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-54-66

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-67-82

Спирidonov В.Ю.

Российская академия архитектуры и строительных наук,
НИЦ градостроительного права ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»
E-mail: sv-abyss@mail.ru

ИНДИКАТОРЫ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ

Аннотация. Представлен срез современных оценочных шкал пространственной организации региональных и городских систем, ориентированный на обеспечение устойчивого, информационно-технологического, архитектурно-градостроительного развития среды жизнедеятельности людей. Предложены теоретические модели унифицированной индексации территориальной и пространственной организации регионов, соответствующие действующей нормативной базе и приоритетным научным исследованиям в сфере критериальности пространственного развития регионов и их частей, а также таблица корреляции различий в условиях пространственного развития регионов. Задача «разработки научных основ и методологии системы оценок качества среды обитания человека», в том числе на региональном уровне, включена в Перечень приоритетных направлений развития прикладных наук и поисковых исследований РААСН и Минстроя России. Методологической базой исследования являются принципы системного подхода к градостроительству, соответствующие закономерностям целеполагания, построения и развития (реализации) сложных систем. Практическая значимость исследования заключается в использовании основных результатов работы в градостроительном обеспечении стратегии пространственного развития России в части применения ее положений в подготовке нормативных требований к градостроительной документации в области пространственного и территориального планирования развития регионов и агломерационных форм расселения; в учебном процессе подготовки по направлениям «Архитектура» и «Градостроительство».

Ключевые слова: критерии оценки, индексация, регион, градостроительство, качество региональной среды.

Введение. Индикативное проектирование и оценка фактического состояния пространственной среды широко применяется во многих сферах городского развития и регулируется государственными нормативно-правовыми документами на национальном и региональном уровне. При этом любые количественные критерии экспериментальны и субъективно-объективны. В отношении объектов градостроительного планирования для установления критериальных показателей требуется проведение апробационных сравнительных проверок и испытаний с учетом временной зависимости. Разнородность ландшафтно-географических, природно-климатических, историко-культурных, социально-экономических, социально-экологических и многих других условий развития является причиной отсутствия на сегодняшний день общепринятой системы индикативного градостроительного планирования на региональном уровне. При этом в отношении степени индивидуальной развитости городов, в том числе архитектурно-планировочной, сегодня существует, как в нормативно-правовом, так и в научно-исследовательском поле, значительное количество оценочных шкал, учитывающих практически все сферы жизнедеятельности людей. Следует отметить, что города обладают не меньшей уникальной разнообразностью,

чем регионы, в которых они развиваются. Возможность классификации и структуризации особых целевых показателей архитектурно-градостроительного развития, выражающихся в числовом значении для регионов, обосновано и возможно благодаря достаточной сформировавшейся научно-исследовательской базе.

Сегодня в России существует огромное количество различных критериев и индикаторов оценки развития регионов, принятых как в рамках международных тенденций и требований, так и исключительно в целях обеспечения национальных интересов. К ним следует отнести критерии и индикаторы социально-экономического развития или потенциала развития регионов [1], эффективности регионального управления (рейтинги губернаторов) [2], научно-технологического и инновационного развития [3], устойчивого развития [4], IQ-регионов [5], индексы качества городской среды в разрезе регионов, различные отраслевые шкалы. Индикативное планирование активно применяется в различных областях государственной деятельности, в сфере градостроительства – это национальные требования к нормативам градостроительного проектирования и критериям качества документов территориального планирования регионального уровня. Однако, индексы качества региональной среды

как результата административно-управленческой работы в сфере градостроительства фактически не установлены и не применяются. Они учитывают только городские пространства и определяются средним значением индексов городов региона относительно размерно-климатических групп. Поэтому задача «разработки научных основ и методологии системы оценок качества среды обитания человека», в том числе на региональном уровне, включена в Перечень приоритетных направлений развития прикладных наук и поисковых исследований РААСН и Минстроя России.

Цель, основные задачи и методика исследования

Целью исследования является предложение теоретической модели унифицированной индексации территориального и пространственного развития регионов России с учетом национальных стратегий и приоритетов развития.

Задачами работы в соответствии с целью определены: 1) характеристика современных отечественных и зарубежных (мировых) оценочных шкал пространственной организации региональных и городских систем, ориентированных на обеспечение устойчивого, информационно-технологического, архитектурно-градостроительного развития среды обитания человека; 2) предложение и обоснование теоретических моделей унифицированной индексации территориальной и пространственной организации регионов, соответствующих действующей нормативной базе и приоритетным научным исследованиям в сфере критериальности пространственного развития регионов и их частей, а также таблица корреляции различий в условиях пространственного развития регионов, объект и предмет индексации.

Методологической базой исследования являются принципы и методы системного анализа и структурирования нормативно-правовых документов, теоретических концепций мирового и отечественного опыта внедрения прогрессивных технологий индикативного стратегического, пространственного и территориального планирования, цифровизации в сфере градостроительства, повышения качества городской и региональной среды, а также теоретического моделирования и построения унифицированной системы индикативного планирования и оценки фактического состояния региональной среды в сфере градостроительства.

Нормативные и научно-исследовательские критерии и индикаторы оценки градостроительного развития регионов

Федеральный перечень ключевых показателей эффективности губернаторов включает ряд

критериев оценки, полностью или частично относящихся к сфере градостроительства: качество городской среды, доля дорожной сети в крупнейших городских агломерациях (соответствующая нормативам), качество окружающей среды, «цифровая зрелость», объем жилищного строительства. При этом методики расчетов данных показателей предусматривают только годовую динамику изменений. Данный перечень сегодня выступает целеполагающим для краткосрочного ведомственного планирования наиболее актуальных секторов развития регионов, но, не является определяющим в вопросах индикативного градостроительного планирования на среднесрочную и отдаленную перспективу.

Следует отметить, что ниже применяемый термин «пространственное развитие» рассматривается в сфере градостроительного обеспечения социально-экономического, экологического и иного развития систем расселения и межселенных территорий регионов.

Требования к индикаторам пространственной оценки регионов в сфере устойчивого развития установлены в Стратегии национальной экологической безопасности на период до 2025 года и в ГОСТ Р ИСО 37120-2015 «Устойчивое развитие сообщества. Показатели городских услуг и качества жизни» (ISO 37120:2014). Стратегия экологической безопасности России рассматривает такие пространственные показатели, как: доля территории страны, не соответствующей экологическим нормативам, в общей доле; доля населения, проживающего на территориях, состояние окружающей среды на которых не соответствует нормам качества. ГОСТ Р ИСО включает направление «Градостроительство», рассматривающее такие критерии, как: площадь зеленых насаждений и количество ежегодно высаживаемых деревьев к числу населения, площадь неофициальных поселений в процентах от площади города, соотношение рабочих мест и жилья. Ряд иных направлений, как «Отдых», включает показатели, относящиеся к сфере городской пространственной организации. Примером выступают такие критерии как площадь крытых и уличных общественных зон отдыха на душу населения. Иных градостроительных шкал оценки на уровне региона данный стандарт не устанавливает.

Международные индикаторы устойчивого развития долгосрочны и группируются в четыре блока: социальный, экономический, экологический и институциональный. Примерами выступают Показатели «Истинных сбережений» и показатели из краткого «Зеленого» справочника Всемирного Банка, «Цели развития тысячелетия» (Обеспечение экологической устойчивости,

ООН), подготовленные для России. Этому тезису соответствуют индикаторы Комиссии по устойчивому развитию при ООН, Мирового развития Всемирного Банка, Индекс развития человеческого капитала ООН, критерии Программы экологических индикаторов Организации Экономического Сотрудничества и Развития, система эколого-экономического учета ООН, мировые экологические («Индекс живой планеты»), «Экологический след», «Индекс экологических достижений») и социально-экономические («Реального прогресса и устойчивого экономического благополучия», «Человеческого Развития», «Скорректированных Чистых Накоплений»), смешанные («Система интегрированных экологических и экономических счетов») индексы. Выраженных требований к градостроительным показателям в них не устанавливается. Следует выделить отдельные критерии оценки обеспечения экологической устойчивости для России: процент территорий с лесным массивом и охраняемыми природными зонами; численность населения, проживающего в особо загрязненных городах; удельный вес городского и сельского жилищного фонда, оборудованного централизованным водопроводом и канализацией; доля ветхого и аварийного жилищного фонда.

Индикаторы оценки формируемого государственного направления «умный» регион в рамках национального проекта «Цифровая экономика» несут технократический (проекты ПАО «Ростелеком» для Нижегородской, Псковской, Тюменской областей, Приморского края, Ненецкого автономного округа, всего 20 пилотных субъектов РФ), экономический (региональная программа «Умная Кубань» Краснодарского края и стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан) и коэволюционный или экосистемный (концепции Свердловской и Ульяновской областей) подходы, согласно Ю.В. Лыщиковой, О.В. Германовой, М.А. Кочергина [6-8]. Интересной для настоящего исследования является концепция оценки регионального развития «ноль проблем» (zero-concept), представленная в доктрине «умной» Свердловской области. Она включает такие критерии как «ноль» потери времени, «ноль» потерь энергии, «ноль» выбросов, «ноль» барьеров, «ноль» использования наличных средств. Следует отметить иерархичность планирования инновационного технологического развития регионов в концепции «умных территорий», предложенной индонезийским исследователем Р. Сутриади, и представленной цепочкой «умный город» – «умная деревня» – «умный регион» [9].

Индексы IQ городов национального стандарта «Умные города» включают десять направлений: городское управление, инновации для городской среды, интеллектуальные системы общественной безопасности, инфраструктура сетей связи, «умное» ЖКХ, «умный» городской транспорт, интеллектуальные системы экологической безопасности, туризм и сервис, интеллектуальные системы социальных услуг, экономическое состояние и инвестиционный климат. При этом объектами индексирования выступают города, сгруппированные по численности населения: крупнейшие (от 1 млн чел.), крупные (250 тыс. – 1 млн чел.), большие (100 – 250 тыс. чел.), административные центры (менее 100 тыс. чел.). Перечень целевых (базовых) и дополнительных показателей цифровизации городского хозяйства (стандарт «Умного города», приказ Минстроя России от 11.05.2022 №357/пр) включает 18 базовых и 18 дополнительных показателей с соответствующим набором индикаторов оценки по направлениям: обратная связь с гражданами, городская среда, жилищно-коммунальное хозяйство, строительство, энергетика, безопасность, геоинформационные технологии, здравоохранение, культура, молодежная политика, наука и высшая школа, образование, предпринимательство, социальная сфера, спорт, транспорт, цифровая трансформация, экология. Предварительный национальный стандарт России ПНСТ 440-2020 (ИСО/МЭК 30146:2019) «Информационные технологии. Умный город. Показатели ИКТ» предусматривает направления индексации развития городов как пригодная для жизни окружающая среда, «умный объект» и эффективное управление. Направление «Руководство, управление» включает следующие индикаторы оценки в сфере градостроительства: ежегодное количество онлайн-посещений муниципального портала открытых данных; доля доступных городских услуг, которые можно получить в режиме онлайн; среднее время получения городских услуг в режиме онлайн; среднее время отклика на запросы; наличие цифровых сервисов, обеспечивающих возможности участия граждан в процессах принятия решений; доля запросов разрешений на строительство; доля городских объектов строительства, данные которых размещены в Системе.

Индексы оценки «умных городов» Научно-исследовательского института технологий и связи строятся по семи ключевым блокам: «умные» экономика, управление, жители, технологии, среда, инфраструктура, финансы. Индикаторы цифровой жизни МШУ «Сколково» предусматривают применение цифровых технологий в

разрезе таких направлений как транспорт, финансы, торговля, здравоохранение, образование, медиа, государственное управление. Основными компонентами «умного» города согласно данных центра региональных наук при Венском технологическом университете выступают: «умные» экономика, люди (жители), управление, мобильность, окружающая среда, проживание. При этом выделяются связанные аспекты городской жизни: промышленность, образование, электронная демократия, логистическая инфраструктура, эффективность и устойчивость, безопасность и качество; а также соответствующие проблемные направления: инфраструктура, безопасность, конфиденциальность, обучение, социальная инклюзия. Схожие структурные направления индикаторов оценки внедрения цифровизации в управление развитием городских секторов представлены в Модели оценки развития «умных городов» IESE, индексации CIMI (Cities in Motion Index) и «цифровой жизни российских городов», в методологии Европейской экономической комиссии ООН, а также в различных международных рейтингах, как Easy Park Smart Cities Index, Global Smart City Performance Index, IESE Cities in Motion Index, Top 50 Smart City Governments и других. Более подробно источники аналитики критериев оценки представлены в таблице (табл. 1).

Несколько иные характеристики «умного» развития территорий муниципальных и региональных социально-экономических систем как источников позитивных пространственно-экономических трансформаций представлены в работе отечественных исследователей Р.В. Шхагошева и А.А. Бахунова [10]. Они включают десять групп таких трансформаций: системный социально-экономический эффект; инвестиционная привлекательность; устойчивый автономный спрос на продукцию базового производства или специализацию; приоритет и стимулирование кластерной формы организации экономической деятельности; кооперация и инновационные формы экономического взаимодействия бизнеса; высокий уровень инфраструктурной обеспеченности всех видов; включение в систему межотраслевых и межрегиональных экономических и социальных связей; абсолютные конкурентные преимущества; особый режим хозяйственной (экономической) деятельности; особый режим регулирования (управления).

Отечественный индекс качества городской среды как наиболее яркий пример индикативного планирования пространственной среды архитектурно-градостроительными средствами учитывает 36 индикаторов, ориентированных на

оценку шести пространств (жилье и прилегающие пространства, общественно-деловая инфраструктура, улично-дорожная сеть, социально-досуговая инфраструктура, озелененные пространства, общегородское пространство) по шести критериям (безопасность, комфортность, экологичность и здоровье, идентичность и разнообразие, современность и актуальность среды, эффективность управления). Также введен коэффициент корреляции показателей по размеру города и природно-климатическим условиям или размерно-климатическим группам. Города группируются по размерам как: крупнейшие от 1 млн чел.; крупные 250 тыс. – 1 млн чел.; большие 100 – 250 тыс. чел.; средние 50 – 100 тыс. чел.; малые: 25 – 50 тыс. чел.; малые: 5 – 25 тыс. чел.; малые: до 5 тыс. чел. Следует отметить, что данная матрица индикаторов построена с учетом международных стандартов в сфере формирования комфортной городской среды, в том числе с учетом программы ООН по населенным пунктам UN Habitat agenda 2030 (Устойчивые города – Основные аспекты политики, Организация экономического сотрудничества и развития).

На сайтах научных электронных библиотек «Elibrary.ru» и «КиберЛенинка» запросы «индикаторы градостроительного развития регионов», «критерии оценки градостроительного развития регионов» не дали полноценных результатов, отвечающих поисковым требованиям. Наиболее близкие к искомой теме публикации, посвященные вопросам: оценки уровня комфортности населенных мест и качества жизни (С. Аргунов, Ю. Коган, И. Рапопорт, М. Назаров, Учет оценок качества жизни в развитии градостроительства, 2014; А.А. Стариков, Качество жизни граждан и комфортная городская среда, 2017; Т.Ю. Овсянникова, М.Н. Преображенская, Индексный подход к оценке качества жизни населения и уровня развития урбанизированных территорий, 2014), депрессивности городских территорий (К.Е. Родяшина, Депрессивные территории в структуре современного города: понятие, характеристики, классификация, 2017), инвестиционному развитию в строительной отрасли (Т.Ю. Овсянникова, Стратегическое планирование развития отраслевых подсистем региональной экономики (на примере строительного комплекса, 2012), сохранению индустриального наследия (Н.В. Боровикова, Критерии сохранения индустриального наследия, 2019), инфраструктурной обеспеченности и доступности (В.И. Савченко, С.А. Киревич, М.В. Савченко, Стоимостное моделирование жизнедеятельности урбанизированных территорий, 2021-2023) [11], эффективности управления в сфере градостроительства (О.Р. Дрогич-

кая, Основные проблемы управления градостроительным развитием поселений, 2015; А.С. Никитин, Критерии экономической и социальной эффективности региональных управленческих команд субъектов Российской Федерации, 2018),

индикации «комплексного и устойчивого развития территорий» (О.В.Кузина, 2019), многим иным смежным темам в сфере городского развития.

Таблица 1

Критерии оценки состояния пространственной среды регионов и городов

«Умный» город РФ	«Умный» город МИР	«Умный» регион РФ и МИР	Индикаторы устойчивого развития РФ	Индикаторы устойчивого развития МИР	Индекс качества городской и региональной среды РФ
Индекс IQ городов (уровень цифровой трансформации, Правительство РФ)	Основные компоненты (центр региональных наук при Венском технологическом университете)	Концепция построения на территории Свердловской области	ИУР России (Показатели Всемирного Банка)	КУР ООН	Минстрой РФ и КБ СТРЕЛКА
Индикаторы умных городов (исследование НИИТС)	Рейтинги умных городов (IMD, WeGo, Juniper Research, др.)	Подходы (по DOI)	«Цели развития тысячелетия» - Обеспечение экологической устойчивости для РФ (ЦРТ, ООН)	Мировые подходы к построению индикаторов (по	Классификатор видов разрешенного использования
Характеристики УГ как источников позитивных пространственно-экономических трансформаций	Рейтинги умных городов (по doi:	Региональные стратегии развития инноваций на основе методологии «умной специализации» (Фонд развития Европейского Союза)	Показатели «истинных сбережений» для РФ (Всемирный Банк)	Индикаторы мирового развития Всемирного Банка (Краткий «зеленый» справочник)	Методика развития территории на основе ее образной идентичности (сборная)
Индекс цифровой жизни (МШУ «Сколково»)	Модель оценки развития «умных городов» IESE	Платформа «Digit Регион» (режим доступа:	Стратегия экологической безопасности на период до 2025 года	Индекс развития человеческого потенциала (ИРЧП) в рамках Программы развития ООН	Показатели для оценки эффективности деятельности высших должностных лиц субъектов РФ
ПНСТ 440-2020 (ИСО/МЭК 30146:2019) «Информационные технологии. Умный город. Показатели ИКТ»	Индекс CIMI		Индикаторы устойчивого развития Томской области	Программа экологических индикаторов ОЭСР	
Перечень целевых (базовых) и дополнительных показателей цифровизации городского хозяйства (стандарт «Умного города»)	Методология Европейской экономической комиссии ООН		ГОСТ Р ИСО 37120-2015 «Устойчивое развитие сообщества. Показатели городских услуг и качества жизни» (ISO	Система эколого-экономического учета (СЭЭУ ООН)	Методики оценки социально-экономического развития регионов
	Стандарты			Экологические индексы	Методики оценки эффективности системы регионального управления
				Социально-экономические индексы	Методики оценки уровня развития инноваций в регионах
				Стандарты ISO	Методики оценки потенциала развития регионов

Более расширенные запросы показали крайне ограниченный набор искомых публикаций, включающий вопросы применения статистического аппарата для мониторинга градостроительного развития и комфортности проживания в различных населенных пунктах. К таким работам следует отнести: применение статистического аппарата для мониторинга градостроительного развития (С.В. Аргунов, Ю.В. Коган, М.Н. Назаров, Н.Г. Старостина, 2019), критерии при разработке индикаторов устойчивого градостроительного развития (А.Ю. Чельшев, 2017), международные рейтинги городов как критерии градостроительного развития (И.Л. Киевский, Л.В. Киевский, Ю.А. Мареев, 2015), многие иные работы. В то же время ряд исследований посвящено вопросам пространственного развития регионов, отражающих приоритеты пространственного регулирования и государственной политики регионального развития, как позитивное экономические выравнивание регионов, с учетом их типизации, сбалансированности пространственной картины расселения (научный доклад Института экономики РАН, 2020). Здесь также следует отметить исследования, посвященные вопросам индикации инновационного развития регионов для целей мониторинга и управления (И.М. Бортник, Ю.В.Г. Зинов, В.А. Коцюбинский, А.В. Сорокина, 2013), программам развития приграничных территорий ДВФО с реализацией градостроительного потенциала (И.В. Зайцева, 2018), эколого-экономическим механизмам управления региональными земельными ресурсами (М.А. Шер, О.В. Ковалева, Л.В. Миронов, 2015), индикации инновационного развития регионов (Н.Р. Мацкевич, 2016; А.Д. Романова, О.А. Доничев, М.А. Баринев, 2017), критериям качества схем территориального планирования регионов (М.Я. Вильнер, 2012).

Наиболее близки к рассматриваемой теме труды, посвященные индикаторам устойчивого территориального развития как количественной оценке, показывающей изменение состояния города и окружающей среды во времени. К ним следует отнести работу И.В. Богомолковой, в которой предлагается структура экономических индикаторов устойчивого территориального развития, включающая такие направления, как управление территориальными ресурсами, устойчивость системы жизнеобеспечения, управление развитием транспортной инфраструктуры, пространственное развитие экономики. В работе предлагается процентное индикативное функциональное зонирование территорий с выделением жилой и общественной застройки, земель общего пользования, а также с процентным соотношением земель государственной, муниципальной и

частной собственности [12]. Также следует отметить труды А.Я. Троцкого и И.В. Мищенко, посвященные вопросам исследования пространственных трансформаций в хозяйственной системе региона, где предлагаются подходы к формированию системы индикаторов и показателей сдвигов в территориальной структуре хозяйства региона. Авторы обращают особое внимание на необходимость внедрения комплексной оценки центропериферийных различий в социально-экономическом развитии основных элементов региональной сельской периферии (районах ближней, средней и дальней периферии), учета взаимосвязи экономического развития городских поселений и сельской периферии, а также характерных черт и особенностей развития городов и сельских территорий региона, формирующихся под воздействием закономерностей его внутренней эволюции [13]. Значимыми в вопросах регулирования среды жизнедеятельности с использованием современных цифровых технологий выступают труды Н.А. Самойловой: прообраз информационно-модели для проведения прикладного исследования любого территориального объекта в разновременные периоды жизненного цикла [14], групповая коммуникация в процессе анализа вариантов градостроительных решений [15].

Принципами индикативного планирования в градостроительном контексте представлены в работе Ю.М. Моисеева. Автор выделяет критерии индикативного планирования (информативность, адресность, инициативность), принципы индикации качества среды (комплексность, сравнимость, гармоничность), уровня ее развития (динамичность, доступность, надежность), принципы индикации эффективности управления (адекватность, комплексность, согласованность, индикация перспектив или мобилизация действий) [16, 17]. Оценка сбалансированности пространственного развития города представлена в работе К.В. Бобровой, рассматривающей вопросы комплексной градостроительной оценки территории, устойчивого развития, эффективности использования территории [18]. Индикаторы оценки качества жизни населения регионов России представлены в работе Е.Ю. Меркуловой, С.П. Спиридонова, В.И. Меньшиковой и включают такие критерии оценки как типология регионов по степени обеспеченности жильем и уровнем его благоустройства, по уровню удовлетворения культурных, спортивных и экологических потребностей населения [19]. Форсайт-технологии в аналитике пространственной динамики и долгосрочном планировании представлены исследователем Н.Г. Парсаданян [20]. Блоч-

структурированная система характеристик и показателей пространственно-экономического анализа предложена в работе М.Ю. Казакова, где выделяются геофизические характеристики территории, показатели освоенности пространства, функциональности территории и качества жизни [21].

Показатели пространственного развития России и ее субъектов представлены в работе Г.А. Лебединской, где индикаторы развития группируются автором по следующим блокам: 1) расселение как процесс и одновременно результат распределения населения, характеризующийся через систему таких признаков, как включенность численности и плотности населения регионов, городов, других поселений, плотности сети сельских поселений, количество городских агломераций, индекс агломеративности; 2) социально-экономическое развитие, уровень хозяйственной освоенности, демографический потенциал, развитость отраслей экономики и в производственной и непроизводственной сферах; 3) инфраструктурная оснащенность; 4) природно-ресурсный потенциал; 5) рекреационный и историко-культурный потенциал; 6) природно-экологический потенциал; 7) состояние окружающей среды [22]. Инструментарий статистического аппарата для мониторинга градостроительного развития, представленный С.В. Аргуновым, Ю.В. Коган, М.Н. Назаровым, Н.Г. Старостиной, ориентирован на комплексное развитие территорий (индекс качества городской среды), градостроительные показатели и качество инфраструктуры, озелененные территории и развитие общественно-деловых районов города [23]. В теоретической модели развития региональной системы расселения М.В. Перьковой, А.Г. Большакова предлагается учитывать вопросы урегулирования конфликтов мотиваций на основе: 1) принципов регулирования устойчивого развития территорий; 2) измерения ресурсного потенциала территорий; 3) определения «кода» идентичности территорий; 4) выявления зон конфликтов мотиваций и их классификаций; 5) методов разрешения конфликтов мотиваций. Основные группы конфликтов мотиваций включают пространственные группы (экологические, социальные, экономические, управленческие, конфигурационные, эстетические) и раскрываются в частных характеристиках территорий как индикаторов их устойчивого развития [24]. Индекс устойчивости пространственного развития регионов рассматривается в работе М.В. Фомина и О.О. Смирнова, где предлагается выделение приоритетных («устойчивых»), функционирующих («стабильных») и проблемных («нестабильных») регионов [25].

Рассматриваемая тема индексации пространственного развития также обсуждается в диссертационных работах Ю.М. Моисеева (Пороги неопределенности в системе градостроительного планирования, МАРХИ, 2017), М.В. Перьковой (Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов: на примере Белгородской области, СПбГАСУ, 2019), Н.А. Самойловой (Специфика и особенности учета нарушенных территорий в районах угледобычи, МГСУ, 2016), Ю.В. Андреевой (Градостроительное развитие агломераций в системе расселения Юга России, СПбГАСУ, 2019), Ю.В. Ордынской (Особенности формирования градостроительных систем в зоне пограничья России и Китая, МАРХИ, 2019), Д.А. Сириной (Направления территориального планирования в системе макрорегиона: на примере Свердловской области, МАРХИ, 2017), М.А. Слепнева (Функциональное зонирование городских природно-антропогенных территориальных комплексов на примере Московского региона, МГСУ, 2017), Го Юнцзюнь (Градостроительное планирование развития функционально-планировочной структуры Чжэнчжоуской агломерации: провинция Хэнань, Китай, СПбГАСУ, 2015).

Методики индексации территориального и пространственного развития регионов.

Предлагаемая в рамках данной работы методика индексации территориального развития регионов опирается на виды разрешенного использования территорий, установленные национальным классификатором видов разрешенного использования и критериями индексной оценки, аналогичными установленным в методике формирования индекса качества городской среды Минстроя России. Данная методика соответствует требованиям действующего законодательства в сфере градостроительства и землепользования, а также применима как для целей индикативного территориального планирования, так и для оценки эффективности регионального управления (табл. 2).

Следует выделить 14 видов территорий (функциональных зон) оценки: сельское хозяйство, жилье, общественное обслуживание, предпринимательство, отдых (рекреация), производство, транспорт, обеспечение обороны и безопасности, особо охраняемые природные территории, леса, водные объекты, территории общего пользования, сады и огороды, ИЖС (в том числе коттеджные и спальные поселки). Критериями оценки выступают: достаточность, безопасность, комфортность, экологичность и здоровье, идентичность и разнообразие, современность и актуальность среды, эффективность управления.

Таблица 2

Индикаторы территориального развития регионов

Территории по ВРИ / Критерии оценки по ИКГС		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
		Достаточность	Безопасность	Комфортность	Экологичность и здоровье	Идентичность и разнообразие	Современность и актуальность среды	Эффективность управления
А, В, Г, Д – УСТАНОВЛИВАЮТСЯ ФЕДЕРАЛЬНЫМИ И РЕГИОНАЛЬНЫМИ ДОКУМЕНТАМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ (ДТП) - схемы территориального планирования и генеральные планы, правила землепользования и застройки, зонирование территории по принципу АГР (согласно ГК РФ о АГО и Законе об архитектурной деятельности)								
Д, Е – УСТАНОВЛИВАЮТСЯ ФЕДЕРАЛЬНЫМИ И РЕГИОНАЛЬНЫМИ СТРАТЕГИЯМИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ (ССЭР)								
Ж – УСТАНОВЛИВАЮТСЯ ФЕДЕРАЛЬНЫМИ НПА и ССЭР								
	Сельское хозяйство	Процентное фактическое зонирование (на основе факта вида использования) ВРИ, % ВРИ от всей территории согласно ДТП	Развитие на основе ДТП, % наличия ДТП для каждой зоны ВРИ и % соответствия ДТП	Развитость инфраструктурной (социальная, транспортная, инженерная, обслуживания) обеспеченности согласно ДТП, % реализации ДТП в части инфраструктурной обеспеченности по зонам ВРИ	Соотношение урбанизированной и природной среды, % изменения соотношения площади озелененных территорий к населению по ДТП, % снижения территорий СЗЗ по ДТП	Зонирование на основе выявления территорий с повышенными архитектурно-художественными требованиями, % реализации АГР, % объектов с согласованным (утвержденным) АГО	Включенность ВРИ в систему межотраслевых и межрегиональных экономических и социальных связей, % от реализованных межрегиональных проектов ССЭР Реализованные объекты имиджевой составляющей, % от всех имиджевых объектов ССЭР	«НОЛЬ» проблем: 1. «0» потеря времени; 2. «0» потеря энергии; выбросов; 4. «0» барьеров; использования федеральных средств, % уровень снижения проблем
	Жилье							
	Общественное обслуживание							
	Предпринимательство							
	Отдых (рекреация)							
	Производство							
	Транспорт							
	Обеспечение обороны и безопасности							
	Особо охраняемые природные территории							
	Леса							
	Водные объекты							
	Территории общего пользования							
	Сады и огороды							
	ИЖС (коттеджные и спальные поселки)							

Индексом достаточности для всех территорий может выступать процентное фактическое зонирование по видам использования земель в соответствии с утвержденными документами территориального планирования региона и его частей. Индекс безопасности определяется процентом наличия документации по планировке территории для каждой зоны и процентом соответствия реализации предложениям такой документации. Уровень комфортности, согласно предлагаемой методике, определяется инфраструктурной (социальной, транспортной, инженерной, обслуживания) развитостью обеспеченности территорий в соответствии с действующими документами территориального планирования, а индексом оценки соответственно выступает процент реализации этого документа в части инфраструктурной обеспеченности в разрезе функциональных зон. Степень экологичности и здоровья рассматривается в рамках соотношения урбанизированной и природной среды и измеряется в процентном соотношении площади озелененных территорий к численности населения и

снижении территорий, расположенных в регулируемых санитарно-планировочных ограничениях.

Критерием оценки идентичности и разнообразия выступает зонирование на основе выявления территорий с повышенными архитектурно-художественными требованиями, согласующееся с требованиями Градостроительного кодекса РФ в части принятия (утверждения) архитектурно-градостроительного облика объектов градостроительной деятельности, а также с требованиями, рассматриваемыми в проекте Закона об архитектурной деятельности. При этом индикатором оценки уровня идентичности и разнообразия может выступать процентное соответствие объектов градостроительной деятельности утвержденным архитектурно-градостроительным и архитектурно-художественным требованиям. Современность и актуальность среды функциональных зон определяются их включенностью в систему межотраслевых и межрегиональных экономических и социальных связей, а также реализованными объектами имиджевой составляющей, в соответствии со стратегиями социально-экономического развития региона, и

индексирующимися процентом их реализации. Эффективность управления может быть оценена по концепции «ноль» проблем (zero-concept): 1) «0» потеря времени; 2) «0» потеря энергии; 3) «0» выбросов; 4) «0» барьеров; 5) «0» использования федеральных средств, и оценивается уровнем снижения данных проблем. Она подробно описана в принятой Концепции построения на территории Свердловской области «Умного региона» («Smart region») и сегодня широко применяется в Мире в рамках установления критериев оценки реализации различных ведомственных программ.

Данная методика индексации оценки развития регионов применима только в отношении территориальных аспектов планирования и не охватывает полный спектр стратегического градостроительного планирования, учитывающего вопросы пространственной организации регионов, в связи с чем наряду с представленной предлагается внедрение второй методики индексации пространственного развития регионов. Данная методика (таб.3), ориентирована на комплексное пространственное планирование и учитывает такие пространственные системы и структуры, как кластерные формы и каркасы. Она согласуется с требованиями Методических рекомендаций по подготовке проектов схем территориального планирования субъектов РФ, федерального законодательства в сфере градостроительства и землепользования. При этом кластерными системами рассматриваются: пространственные системы населенных мест, в том числе городские

агломерации и их группы (ПСНМ); производственные пространственные комплексы с инновационной инфраструктурой (ППКиИИ); природно-рекреационные пространственные комплексы (ПРПК); сельскохозяйственные пространственные комплексы (СПК). К региональным каркасным системам и инфраструктурам следует отнести: транспортно-логистический каркас (ТЛК); инженерный каркас (ИК); социальную инфраструктуру коммерческого и некоммерческого назначения (СИ); рекреационно-туристическую инфраструктуру (РТИ); историко-культурную и природоохранную инфраструктуру (ИКПИ); пространственные структуры индивидуального жилищного строительства, включая территории дачного и малоэтажного жилья, садов и огородов (ИЖСиСД).

Нормативные и научно-исследовательские индикаторы оценки градостроительного развития регионов позволяет выделить 10 видов критериев оценки вышеперечисленных пространственных систем и структур, отвечающих общероссийским и международным требованиям в отношении вопросов градостроительного планирования устойчивого и социально-экономического развития, оценки качества региональной городской среды, IQ-регионов. К таким критериям оценки регионов относятся: степень использования, природные ресурсы, качество жизни, социальный и человеческий капитал, конкурентоспособность, транспорт и инженерия, информационно-коммуникационные технологии, эмоциональное восприятие, «умные» технологии и специализации, эффективность управления.

Таблица 3

Индикаторы пространственного развития регионов

Пространственные структуры / Критерии оценки	А Степень (Ко) использования	Б Природные ресурсы	В Качество жизни	Г Социальный и человеческий капитал	Д Конкурентоспособность	Е Транспорт и инженерия	Ж ИКТ (информ. коммуникационные технологии)	З Эмоциональное восприятие	И Умные технологии и специализации	К Эффективность управления
	А, Б, Г, Д, Е, К – УСТАНОВЛИВАЮТСЯ ФЕДЕРАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СГПР НА КРАТКОСРОЧНУЮ, СРЕДНЕСРОЧНУЮ И ОТДАЛЕННУЮ ПЕРСПЕКТИВУ (СТРАТЕГИЯ ГРАД. ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ) В, Ж, З, И – УСТАНОВЛИВАЮТСЯ ФЕДЕРАЛЬНЫМИ НПА									
ПСНМ	Вовлеченность территории ПСНМ, % задействованности территории	Наличие и целостность зеленых каркасов ПСНМ, степень связности и % от всей территории	Наличие площадки цифрового института ПСНМ, % вовлеченных (заинтересованных групп)	Внедрение уникальных элементов ПСНМ в развитие, % от возможных	Наличие зон совместных интересов ПСНМ	Степень связности элементов ПСНМ	Наличие системы цифровых индикаторов ПСНМ, % внедренных индикаторов	Эмоциональная удовлетворенность жителей АГР ПСНМ, % положительных отзывов	Наличие «цифрового двойника» ПСНМ, % внедренных элементов	Степень кластерности ПСНМ, % НМ, включенных в единое пространственное развитие
ППКиИИ	Вовлеченность территории	Наличие и целостность	Наличие площадки цифрового	Внедрение уникальных	Наличие зон	Степень связности	Наличие системы цифровых	Эмоциональная удовлетворенность	Наличие «цифрового	Степень кластерности ППКиИИ,

		ППКиИ, % заде- йстви- тельности террито- рии	ность зе- леных каркасов ППКиИ И, степень связно- сти и % от всей терр-ии	института ППКиИИ, вовлечен- ных (заин- тересован- ных групп)	каль- ных элемен- тов ППКи ИИ в разви- тие, % от воз- мож- ных	сов- мест- ных инте- ресов ППКи ИИ, % от воз- мож- ных	эле- ментов ППКи ИИ, % от воз- мож- ных	индикато- ров ППКиИИ, внедрен- ных инди- каторов	жителей АГР ПСНМ, % положи- тельных отзывов	двой- ника» ППКиИ И, % внед- ренных элемен- тов	% ПК и ИИ, вклю- ченных в единое простран- ственное развитие
	ПРПК	Вовле- ченность террито- рии ПРПК, % заде- йстви- тельности террито- рии	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов ПРПК, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института ПРПК, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов ПРПК в раз- витие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов ПРПК, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов ПРПК, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров ПРПК, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР ПРПК, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» ПРПК, % внед- ренных элемен- тов	Степень кластерно- сти ПРПК, % ПРПК, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	ТЛК	Вовле- ченность террито- рии ТЛК, % обес- печения	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов ТЛК, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института ТЛК, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов ТЛК в разви- тие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов ТЛК, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов ТЛК, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров ТЛК, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР ТЛК, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» ТЛК, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти ТЛК, % объек- тов ТЛ инфр-ры, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	ИК	Вовле- ченность террито- рии ИК, % обес- печения	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов ИК, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института ИК, вовлечен- ных (заин- тересован- ных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов ИК в раз- витие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов ИК, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов ИК, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров ИК, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР ИК, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» ИК, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти ИК, % объек- тов И инфр-ры, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	СИ	Вовле- ченность террито- рии СИ, % обес- печения	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов СИ, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института СИ, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов СИ в раз- витие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов СИ, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов СИ, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров СИ, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР СИ, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» СИ, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти СИ, % соц. объектов, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	РТИ	Вовле- ченность террито- рии РТИ, % обес- печения	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов РТИ, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института РТИ, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов РТИ в разви- тие,	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов РТИ,	Сте- пень связ- ности эле- ментов РТИ, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров РТИ, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР РТИ, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» РТИ, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти РТИ, % НМ, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие

					% от воз- мож- ных	% от воз- мож- ных					
	ИКПИ	Вовле- ченность террито- рии ИКПИ, % со- хранно- сти	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов ИКПИ, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института ИКПИ, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов ИКПИ в раз- витие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов ИКПИ % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов ИКПИ % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров ИКПИ, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР ИКПИ, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» ИКПИ, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти ИКПИ, % объек- тов насле- дия (ИКиПН), включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	СПК	Вовле- ченность террито- рии СПК, задей- ствован- ности террито- рии	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов СПК, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института СПК, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов СПК в разви- тие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов СПК, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов СПК, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров СПК, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР СПК, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» СПК, % внед- ренных элемен- тов	Степень кластерно- сти СПК, % СК, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие
	ИЖ- СиСД	Вовле- ченность террито- рии ИЖ- СиСД, % задей- ствован- ности террито- рии	Наличие и це- лост- ность зе- леных каркасов ИЖ- СиСД, степень связно- сти и % от всей терр-ии	Наличие площадки цифрового института ИЖСиСД, % вовле- ченных (заинтере- сованных групп)	Внед- рение уни- каль- ных элемен- тов ИЖ- СиСД в разви- тие, % от воз- мож- ных	Нали- чие зон сов- мест- ных инте- ресов ИЖ- СиСД, % от воз- мож- ных	Сте- пень связ- ности эле- ментов ИЖ- СиСД, % от воз- мож- ных	Наличие системы цифровых индикато- ров ИЖ- СиСД, % внедрен- ных инди- каторов	Эмоцио- нальная удовлетво- ренность жителей АГР ИЖ- СиСД, % положи- тельных отзывов	Наличие «цифро- вого двой- ника» ИЖ- СиСД, % внед- ренных элемен- тов	Степень каркасно- сти ИЖ- СиСД, % ИЖ- СиСД, включен- ных в еди- ное про- стран- ственное развитие

Степень (коэффициент) использования пространственных систем и структур характеризуется вовлеченностью их территорий и выражается в процентном соотношении задействованности всех территорий в кластерах и каркасах. Показатель природные ресурсы отражает наличие и целостность зеленых каркасов всех систем и структур с учетом степени их связности в процентном соотношении к территории индексируемых кластерных форм и пространственных каркасов. Качество жизни выражается в наличие соответствующих площадок цифрового института и оценивается в процентном соотношении вовлеченных (заинтересованных групп). Социальный и человеческий капитал оценивается внедрением уникальных элементов в развитие пространственных систем и структур в процентном соотношении от возможных. Критерием показателя конкурентоспособности выступает наличие зон совместных интересов и индексируется в процентах от возможных. Транспорт и инженерия

характеризуется степенью связности планировочных элементов в процентном соотношении. Индикатором оценки внедрения информационно-коммуникационных технологий выступает наличие системы цифровых индикаторов, применительно к пространственным системам и каркасам. Критерий эмоционального восприятия предлагается оценивать уровнем эмоциональной удовлетворенности жителей архитектурно-градостроительным развитием в количестве положительных и отрицательных отзывов. «Умные» технологии и специализации характеризуются наличием и числом внедренных элементов «цифрового двойника» пространственных систем и структур. Эффективность управления определяется степенью кластерности или каркасности этих пространственных систем и структур.

В целях корреляции различий в условиях пространственного развития регионов предлагается введение коэффициентов индексации территориального или пространственного развития. Они представлены ниже в табличной форме

(таб.4) и представляют собой структуру взаимосвязей различных групп регионов с наличием крупнейших, крупных, больших и малых городов, как основных стимулов и точек их развития. К группам регионов в рамках данных методик индексации предлагается отнести следующие: размерная группы регионов по их площади, при-

родно-климатические группы, группы перспективных экономических специализаций, инвестиционного климата по наличию пространственных инновационных кластеров и центров, инвестиционного климата по наличию ОЭЗ, ТОР или ЗТР, группы по плотности населения, по федеральным инвестициям в регион и по приграничности регионов.

Таблица 4

Коэффициенты индексов регионов

Наличие городов / группа региона		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
		Размерная группа по площади	Природно-климатическая группа	Группа перспективных экономических специализаций	Группа инвестиционного климата по наличию пространственных инновационных кластеров и центров	Группа инвестиционного климата по наличию ОЭЗ, ТОР или ЗТР	Группа по плотности населения	Группа по федеральным инвестициям в регион	Группа по приграничности региона
	крупнейших городов от 1 млн чел.	1А	1Б	1В	1Г	1Д	1Е	1Ж	1З
	крупных городов 500 тыс. – 1 млн чел.	2А	2Б	2В	2Г	2Д	2Е	2Ж	2З
	крупных городов 250 тыс. – 500 тыс. чел.	3А	3Б	3В	3Г	3Д	3Е	3Ж	3З
	больших городов 100 – 250 тыс. чел.	4А	4Б	4В	4Г	4Д	4Е	4Ж	4З
	средних городов 50 – 100 тыс. чел.	5А	5Б	5В	5Г	5Д	5Е	5Ж	5З
	малых городов до 50 тыс. чел.	6А	6Б	6В	6Г	6Д	6Е	6Ж	6З

Выводы. Индикативное проектирование и оценка фактического состояния пространственной среды широко применяется во многих сферах управления и регулируется государственными нормативно-правовыми актами на национальном и региональном уровне. Однако, в сфере территориального и пространственного развития регионов отсутствует общепринятая структура критериев оценки, что связано как с многоотраслевым характером, так и с отсутствием в нормативно-правовом поле единой классификации элементов пространственной организации регионов, а именно объектов индексации. При этом предмет индексации широко применяется и нормативно представлен.

Предложенные теоретические модели унифицированной индексации территориальной и

градостроительной пространственной организации регионов, а также таблица корреляции различий в условиях их развития, не противоречат действующей нормативной базе и приоритетным научным исследованиям в сфере критериальности отраслей пространственного развития регионов. Индикаторы территориального развития регионов рассматривают объектом индексации виды территорий, установленные в рамках федерального классификатора видов разрешенного использования, как основной объект территориального планирования. Такой подход не определяет территорию региона как градостроительную систему и не может представлять интересы его пространственной организации. Поэтому предлагается вторая система индикаторов пространственного развития регионов, где объектом ин-

дикативного проектирования и оценки фактического состояния пространственной среды предлагается набор комплексов и каркасов: пространственные системы населенных мест, в том числе городские агломерации, их группы; производственные пространственные комплексы и инновационная инфраструктура; природно-рекреационные пространственные комплексы; транспортно-логистический каркас; инженерный каркас; социальная инфраструктура коммерческого и некоммерческого назначения; рекреационно-туристическая инфраструктура; историко-культурная и природоохранная инфраструктура; сельскохозяйственные пространственные комплексы; пространственные структуры ИЖС, включая территории дачного и малоэтажного жилья, садов и огородов. Такой подход обосновывает как объект, так и предмет индексации пространственной организации регионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чиркунова Е.К., Марков А.Д. Теоретические подходы к оценке социально-экономического развития региона // Сборник научных трудов 12-й Международной научно-практической конференции «Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах». Курский филиал Финансового университета при Правительстве РФ. 2023. DOI: 10.47581/2022/FA-21/MArkov.01
2. Ефремова В.Н. Экспертные рейтинги как инструменты оценки деятельности глав регионов (на примере рейтингов эффективности губернаторов) // Политическая наука. 2015. № 3. С. 112–124.
3. Малышева Ю.В., Тесленко И.Б. Индексы оценки инновационного развития регионов России // Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие социально-экономических систем: условия, результаты и возможности». Государственный гуманитарно-технологический университет. 2021. С. 56–60.
4. Тасуева Т.С., Цуцулаева Б.Р. Индикаторы устойчивого развития экономики региона // Вестник ГГНТУ. Гуманитарные и социально-экономические науки. 2021. Том 17. № 4 (26). С. 23–28. DOI: 10.34708/GSTOU.2021.50.48.004
5. Сугоняев, К.В., Григорьев, А.А., Панфилова, А.С. Москва как центр гравитации интеллекта (на примере среднего IQ городских округов Московской области) // ЦИТИСЭ. 2020. № 4 (26). С. 90–102. DOI: 10.15350/2409-7616.2020.4.09
6. Лыщикова Ю.В., Германова О.В., Кочергин М.А. Внедрение концепции "умный регион": управленческие практики в России и за рубежом // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2020. С. 146–150. DOI: 10.23672/t7159-4515-9922-k
7. Стрябкова, Е.А., Лыщикова, Ю.В. От «Умного города» к «Умному региону»: эволюция концепта или новая парадигма развития // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2018. Vol. 8. Pp. 248–255.
8. Лыщикова, Ю.В. Концепция «умный регион»: методология и инструментарий // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции «Пространственное развитие территорий». Белгородский государственный национальный исследовательский университет. 2021. С. 46–51.
9. Sutriadi R. Defining smart city, smart region, smart village, and technopolis as an innovative concept in Indonesia's urban and regional development themes to reach sustainability // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2018. Pp. 105–115. DOI:10.1088/1755-1315/202/1/012047
10. Шагошев Р.В., Бахунов А.А. Индикаторы оценки «умного» развития территории // Государственное и муниципальное управление. 2022. № 2. С. 50–61. DOI: 10.22394/2079-1690-2022-1-2-50-61
11. Sarchenko V., Khirevich S.A. Cost modeling of the urbanized territories living environment // E3S Web of Conferences 403. 2023. No. 01011. DOI:10.1051/e3sconf/202340301011
12. Богомолова И.В. Индикативное планирование устойчивого территориального развития городов: опыт и перспективы // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 3: Экономика. Экология. 2012. № 1 (20). С.101–108.
13. Троцкий А.Я., Мищенко И.В. Исследование пространственных трансформаций в хозяйственной системе региона // Известия Алтайского государственного университета. 2015. № 2/1 (86). С. 181–187. DOI: 10.14258/izvasu(2015)2.1-35
14. Самойлова Н.А. Градостроительная инновационная технология: прообраз информационной модели регулирования среды жизнедеятельности // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 3. С. 95–106. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13095
15. Самойлова Н.А., Жирков О.А., Белкин С.В. Групповая коммуникация в процессе анализа вариантов градостроительных решений (на примере объектов Московского региона) // Коммуникология. 2020. Том 8. № 2. С. 53–79. DOI: 10.21453/2311-3065-2020-8-2-53-79

16. Моисеев Ю.М. Принципы индикативного планирования в градостроительном контексте // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2009. № 2(7). С.1–10.
17. Моисеев Ю.М. Функциональная аналитика систем градостроительного планирования: наращивание потенциала // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2011. № 2 (15). С. 1–11.
18. Боброва К.В. Оценка сбалансированности пространственного развития города как основы принятия градостроительных решений (на примере Саратова) // Выпускная квалификационная работа: магистерская диссертация. 2017. 98 с.
19. Меркулова Е.Ю., Спиридонов С.П., Меньшикова В.И. Индикаторы оценки качества жизни населения регионов России // *Экономический анализ: теория и практика*. 2018. Т.17. № 11. С. 2066–2090.
20. Парсаданян Н.Г. Форсайт-технологии в аналитике пространственной динамики // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022. № 2 (59). С. 175–191. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-175-191
21. Казаков М.Ю. Делимитация периферийных территорий в рамках мониторинга тенденций пространственно-экономического развития аграрно-индустриального региона // *Экономический анализ: теория и практика*. 2019. Т. 18. № 2. С. 234–251. DOI: 10.24891/ea.18.2.234
22. Лебединская Г.А. О необходимых показателях пространственного развития Российской Федерации и ее субъектов // *Градостроительство*. 2013. № 1. С. 66–73.
23. Аргунов С.В., Коган Ю.В., Назаров М.Н., Старостина Н.Г. Применения статистического аппарата для мониторинга градостроительного развития // *Государственная служба*. 2019. № 6. С. 66–71.
24. Перькова М.В., Большаков А.Г. Теоретическая модель развития региональной системы расселения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 1. С.105–111. DOI: 10.12737/24093
25. Фомин М.В., Смирнов О.О. Устойчивость пространственного развития регионов Сибири и Дальнего востока России // *Вопросы государственного и муниципального управления*. 2022. № 1. С. 124–147. DOI: 10.17323/1999-5431-2022-0-1-124-147

Информация об авторах

Спиридонов Владимир Юрьевич, кандидат архитектуры, советник Российской академии архитектуры и строительных наук, старший научный сотрудник НИЦ градостроительного права ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»

Поступила 21.11.2023 г.

© Спиридонов В. Ю., 2023

Spiridonov V. Yu.

*Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Research Center of Urban Planning Law of the Federal State Budgetary Institution
"TSNIIP of the Ministry of Construction of Russia"
E-mail: sv-abyss@mail.ru*

INDICATORS OF TERRITORIAL AND SPATIAL REGIONAL DEVELOPMENT

Abstract. A cross-section of modern evaluation scales of the spatial organization of regional and urban systems is presented, focused on ensuring sustainable, information technology, architectural and urban development of the living environment of people. Theoretical models of unified indexing of the territorial and spatial organization of regions are proposed, corresponding to the current regulatory framework and priority scientific research in the field of criteria of spatial development of regions and their parts, as well as a table of correlation of differences in the conditions of spatial development of regions. The task of "developing the scientific foundations and methodology of the human habitat quality assessment system", including at the regional level, is included in the List of priority areas for the development of applied sciences and exploratory research of the RAASN and the Ministry of Construction of Russia. The methodological basis of the research is the principles of a systematic approach to urban planning, corresponding to the laws of goal-setting, construction and development (implementation) of complex systems. The practical significance of the research lies in the use of the main results of the work in the urban planning support of the spatial development strategy of Russia in terms of the application of its provisions in the preparation of regulatory requirements for urban

planning documentation in the field of spatial and territorial planning of the development of regions and agglomeration forms of settlement; in the educational process of preparation in the areas of "Architecture" and "Urban Planning".

Keywords: *evaluation criteria, indexing, region, urban planning, the quality of the regional environment*

REFERENCES

1. Chirkunova E.K., Markov A.D. Theoretical approaches to assessing the socio-economic development of the region [Teoreticheskiye podkhody k otsenke sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona]. Collection of scientific papers of the 12th International Scientific and Practical Conference "Modern approaches to the transformation of concepts of state regulation and management in socio-economic systems". Kursk branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation. 2023. DOI: 10.47581/2022/FA-21/MARKOV.01
2. Efremova V.N. Expert ratings as tools of evaluation region's governors (the case of the efficiency rating of regional leaders) [Ekspertnyye reytingi kak instrumenty otsenki deyatel'nosti glav regionov (na primere reytingov effektivnosti gubernatorov)]. Political science. 2015. Vol. 3. Pp. 112–124.
3. Malysheva Yu.V., Teslenko I.B. Indices for assessing the innovative development of Russian regions [Indices for assessing innovative development of Russian regions]. Collection of scientific papers of the IX International Scientific and practical Conference "Innovative development of socio-economic systems: conditions, results and opportunities". State University of Humanities and Technology. 2021. Pp. 56–60.
4. Tasueva T.S., Tsutsulaeva B.R. Indicators of sustainable economic development in the region [Indikatoriy ustoychivogo razvitiya ekonomiki regiona]. Bulletin of the Grozny State Petroleum Technical University. Humanities and socio-economic sciences. 2021. Vol. 17. No. 4 (26). Pp. 23–28. DOI: 10.34708/GSTOU.2021.50.48.004
5. Sugonyaev K.V., Grigoriev, A.A., Panfilova, A.S. Moscow as the center of gravity of intelligence (on the example of the average IQ of urban districts of the Moscow region) [Moskva kak tsentr gravitatsii intellekta (na primere srednego IQ gorodskikh okrugov Moskovskoy oblasti)]. CYTIS. 2020. No. 4 (26). Pp. 90–102. DOI: 10.15350/2409-7616.2020.4.09
6. Lyschikova Yu.V., Germanova O.V., Kochergin M.A. Introduction of the concept of "smart region": management practices in Russia and abroad [Vnedreniye kontseptsii «umnyy region»: administrativnyye praktiki v Rossii i za rubezhom.]. Humanities, socio-economic and social sciences. 2020. Pp. 146–150. DOI: 10.23672/t7159-4515-9922-k. (rus)
7. Stryabkova E.A., Lyhikova E.V. From "Smart city" to "Smart region": evolution of the concept or a new development paradigm [Kontseptsiya «umnyy region»: metodologiya i instrumentariy]. Economics: yesterday, today and tomorrow. 2018. Vol. 8. Pp. 248–255. (rus)
8. Lyschikova Yu.V. The concept of "smart region": methodology and tools [Kontseptsiya «umnyy region»: metodologiya i instrumentariy]. Collection of scientific papers of the IV International Scientific and practical Conference "Spatial development of territories". Belgorod State National Research University. 2021. Pp. 46–51. (rus)
9. Sutriadi R. Defining smart city, smart region, smart village, and technopolis as an innovative concept in Indonesia's urban and regional development themes to reach sustainability. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2018. Pp. 105–115. DOI:10.1088/1755-1315/202/1/012047
10. Shkhagoshev R.V., Bakhunov A.A. Indicators of assessment of "smart" development of the territory [Indikatoriy otsenki «umnogo» razvitiya territorii]. State and municipal administration. 2022. No. 2. Pp. 50–61. DOI: 10.22394/2079-1690-2022-1-2-50-61 (rus)
11. Sarchenko V., Khirevich S.A. Cost modeling of the urbanized territories living environment. E3S Web of Conferences 403. 2023. No. 01011. DOI:10.1051/e3sconf/202340301011
12. Bogomolova I.V. Indicative planning of sustainable territorial development of cities: experience and prospects [Indikativnoye planirovaniye uchityvayet territorii razvitiya gorodov: opyt i perspektivy]. Bulletin of Volgograd State University. Ser. 3: Economics. Ecology. 2012. No. 1 (20). Pp. 101–108. (rus)
13. Trotskovsky A.Ya., Mishchenko I.V. Investigation of spatial transformations in the economic system of the region [Issledovaniye prostranstvennykh preobrazovaniy v ekonomicheskoy sisteme regiona]. Proceedings of the Altai State University. 2015. No. 2/1 (86). Pp. 181–187. DOI 10.14258/izvasu(2015)2.1-35. (rus)
14. Samoilova N.A. Urban innovative technology: a prototype of the information model of regulation of the life environment [Gradostroitel'naya innovatsionnaya tekhnologiya: proobraz informatsionnykh modeley regulirovaniya sredy zhiznedeystel'nosti]. Ecology of urbanized territories. 2019. No. 3. Pp. 95–106. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13095. (rus)
15. Samoylova N.A., Zhirkov O.A., Belkin S.V. Group communication in the process of analyzing

options for urban planning solutions (on the example of objects in the Moscow region) [Gruppovaya kommunikatsiya po variantam analiza protsessov gradostroitel'nykh resheniy (na osnove ob'yektov Moskovskogo regiona)]. *Communicologia*. 2020. Vol. 8. No. 2. Pp. 53–79. DOI: 10.21453/2311-3065-2020-8-2-53-79. (rus)

16. Moiseev Yu.M. Principles of indicative planning in the urban context [Printsiipy indikativnogo planirovaniya v gradostroitel'nom periode]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2009. No. 2(7). Pp. 1–10. (rus)

17. Moiseev Yu.M. Functional analytics of urban planning systems: capacity building [Funktsional'naya analitika sistemy gradostroitel'nogo planirovaniya: narashchivaniye vozmozhnostey]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2011. No. 2 (15). Pp. 1–11. (rus)

18. Bobrova K.V. Evaluation of the balance of spatial development of the city as a basis for making urban planning decisions (on the example of Saratov) [Otsenka sbalansirovannosti prostranstvennogo razvitiya goroda kak osnova prinyatiya gradostroitel'nykh resheniy (po printsipu Saratova)]. Final qualifying work: master's thesis. 2017. 98 p. (rus)

19. Merkulova E.Yu., Spiridonov S.P., Menshikova V.I. Indicators for assessing the quality of life of the population of Russian regions [Indikatoriy otsenki kachestva zhizni naseleniya regionov Rossii]. *Economic analysis: theory and practice*. 2018. Vol.17. No. 11. Pp. 2066–2090. (rus)

20. Parsadanyan N.G. Foresight technologies in spatial dynamics analytics [Forsayt-tekhnologii v analitike prostranstvennoy dinamiki]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022. No. 2

(59). Pp. 175–191. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-175-191. (rus)

21. Kazakov M.Y. Delimitation of peripheral territories within the framework of monitoring trends in spatial and economic development of an agrarian-industrial region [Delimitatsiya periferiynykh territoriy v ramkakh Diptikhi-tsentra prostranstvenno-ekonomicheskogo razvitiya agrarno-industrial'nogo regiona]. *Economic analysis: theory and practice*. 2019. Vol. 18. No. 2. Pp. 234–251. DOI: 10.24891/ea.18.2.234. (rus)

22. Lebedinskaya G.A. On the necessary indicators of spatial development of the Russian Federation and its subjects [O neobkhodimyykh pokazatelyakh prostranstvennogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii i yeye sub'yektov]. *Urban planning*. 2013. No. 1. Pp. 66–73. (rus)

23. Argunov S.V., Kogan Yu.V., Nazarov M.N., Starostina N.G. Applications of statistical apparatus for monitoring urban development [Primeneniye statisticheskogo oborudovaniya dlya Diptikhov gradostroitel'nogo razvitiya]. *Public service*. 2019. No. 6. Pp. 66–71. (rus)

24. Perkova M.V., Bolshakov A.G. Theoretical model of regional settlement system development [Teoreticheskaya model' razvitiya regional'noy sistemy rasseleniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 1. Pp. 105–111. DOI: 10.12737/24093. (rus)

25. Fomin M.V., Smirnov O.O. Stability of spatial development of the regions of Siberia and the Russian Far East [Global'nost' prostranstvennogo razvitiya regionov Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossii]. *Issues of state and municipal administration*. 2022. No. 1. Pp. 124–147. DOI: 10.17323/1999-5431-2022-0-1-124-147. (rus)

Information about the authors

Spiridonov, Vladimir Yu. Candidate of architecture, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, senior researcher. E-mail: sv-abyss@mail.ru. Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction of Russia (29, Vernadsky Av., Moscow, 119331. TsNIIIP Ministry of Construction of Russia

Received 21.11.2023

Для цитирования:

Спирidonov В.Ю. Индикаторы территориального и пространственного развития регионов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 67–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-67-82

For citation:

Spiridonov V.Yu. Indicators of territorial and spatial regional development. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 12. Pp. 67–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-67-82

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-83-96

^{1,*}Онищук В.И., ^{1,2}Лазарова Ю.С., ¹Прохоренков Д.С., ¹Фанина Е.А., ¹Линец В.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК»

*E-mail: v.onishchuk@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТЕКОЛ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВОЛОКНА, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ

Аннотация. Достижение технологического суверенитета в области производства композитных материалов сегодня требует оперативного увеличения объемов производства стекловолокон специального назначения. Вместе с тем, научные решения в этой области должны быть эффективны, как с технологической, так и экономической точки зрения. В статье представлены результаты исследований, формирующие представление о возможности применения техногенных отходов ТЭЦ в промышленном производстве электроизоляционных и высокомодульных стекловолокон. Поскольку технологическая эффективность волокнообразования во многом определяется склонностью расплавов к кристаллизации, то большая часть исследований была направлена на изучение процесса кристаллизации, определения температурного интервала кристаллизации и идентификации природы продуктов кристаллизации. Установлено, что в интервале температур 1100–1200 °С продукты кристаллизации представлены диопсидом и анортитом, которые при повышении температуры подвергаются аморфизации и последующем растворении в стеклофазе. В стекле S продукты кристаллизации в интервале температур 1200–1300 °С представлены минералами непрерывного изоморфного ряда альбит-анортит и незначительным содержанием железистых минералов – магнетита, гематита или гетита. Полученные данные позволят разрабатывать рациональные параметры процесса формирования стекловолокон или способы подавления такого нежелательного для технологии явления, как кристаллизация в интервале формования.

Ключевые слова: стекловолокна, составы, диаграммы состояния, кристаллизация, продукты кристаллизации, идентификация.

Введение. Являясь относительно «молодым» видом материала, получаемого из стекла, стекловолокно, благодаря своим уникальным качествам, уже к середине прошлого века завоевало широкую популярность при получении различных композитных материалов.

Применение стекловолокон в различных отраслях промышленности в начале этого века распределялось следующим образом: в строительстве зданий и сооружений различного назначения (29 %), транспорт (25 %), электричество и электроника (16 %), спорт и отдых (14 %), промышленное оборудование (11 %) [1].

Анализ областей применения композитных материалов в условиях современного состояния и тенденций развития разных отраслей промышленности и, в частности, потребностей ОПК России, наглядно свидетельствует о необходимости как интенсификации производства стекловолокон, так и интенсификации научных работ и практического применения их результатов для создания эффективных композитов, способных находить применение в авиастроении [2–5], строительстве зданий и сооружений из стеклофибробетонов, усиления конструкций зданий при их восстановлении после частичных разрушений, а

также при создании оборудования для электроэнергетики, электронике, средствах индивидуальной баллистической защиты и др. [6–8].

Не менее важным фактором, стимулирующим интенсификацию отечественного производства стекловолокон и научных разработок в этой области, является необходимость достижения технологического суверенитета, обеспечивающего не только поддержание имеющегося уровня применения композитных материалов, но и кратного наращивания объемов их производства. Так, на сегодняшний день из всех используемых армирующих волокон, стекловолокна применяются в 78% от всех выпускаемых полимерных композитных материалов (ПКМ), как органической, так и неорганической природы [9]. Такое широкое их применение объясняется высокими показателями свойств, которые обеспечивают ПКМ высокую прочность, модуль упругости, долговременную эксплуатацию в условиях экстремальных температур и агрессивных сред.

По свойствам ПКМ подразделяются на две основные группы: низко- и высокомодульные. Низкомодульные стеклопластики армируют стекловолокнами типа Е, а высокомодульные стеклопластики, к которым предъявляются более

высокие требования по прочности и жесткости, армируются стеклянными волокнами типа S, обладающими в сравнении с другими типами непрерывных волокон рекордными значениями прочности и модуля упругости.

Стекловолокна типа S и E по своему составу почти на 70 % состоят из суммы двух тугоплавких оксидов SiO_2 и Al_2O_3 , которые в состав стекла вводят путем использования качественных кварцевых песков и дорогостоящего технического глинозема, из чего вытекает необходимость их замены недефицитными и недорогостоящими материалами – отходами техногенного происхождения.

В качестве материала, пригодного для производства стекловолокон типа E и S могут использоваться техногенные отходы [10, 11], образующиеся при сжигании углей с целью генерации электроэнергии тепловыми электростанциями, представляющие собой алюмосиликатный материал, химический состав которого близок к химическому составу непрерывных стеклянных волокон типа E, S.

Рациональность промышленного использования техногенных отходов ТЭЦ в качестве сырья в производстве стекловолокон будет иметь синергический эффект, поскольку обеспечивает решение не только технологических, но и экологических проблем, связанных с переработкой огромных накопленных десятилетиями объемов золоотвалов.

Методы, оборудование, материалы. Идентификация продуктов кристаллизации стекол типа E и S, синтезированных на основе техногенных отходов ТЭЦ [10,11], проводилась с использованием общепринятых методик и оборудования, позволяющего достоверно установить природу кристаллических фаз, образовавшихся в стеклах при определенных температурах.

На первом, априорном этапе производилась теоретическая оценка кристаллизации опреде-

ленных продуктов в исследуемых составах стекол, синтезированных в системах $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [12].

Синтез стекол проводился в лабораторной стекловаренной печи с карбидкремниевыми электронагревателями в корундовых тиглях вместимостью 200 мл. Общая длительность синтеза составила 8 ч, из которых выдержка при максимальной температуре – 1 ч. Выдержка при максимальной температуре с целью дегазации расплава производилась для стекла E при температуре 1450 °C, для стекла S – 1500 °C.

Комплексная идентификация продуктов кристаллизации проводилась методами растровой электронной микроскопии при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU, позволяющего получать СЭМ изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени и рентгенофазового анализа, выполняемого на рентгеновском дифрактометре ARLX'TRAc последующей расшифровкой рентгеновских порошковых дифрактограмм [13].

Основная часть. Бесщелочное алюмоборо-силикатное стекло E имеет эвтектический состав в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ со следующим содержанием оксидов: 62 % SiO_2 , 14,7 % Al_2O_3 и 23,3 % CaO , содержащие щелочей поддерживается на уровне менее 2%. Высокомодульные стекловолокна (S) синтезируют в двух областях: либо в системе магнезиально-алюминатных составов с содержанием до 80 мас.% SiO_2 и Al_2O_3 , при обязательном присутствии одного из анионов, уплотняющих структуру стекла (MgO , TiO_2 , ZrO , Li_2O , ZnO), либо в области, где ограничиваются наличием только оксидов кремния, и в стекло вводится до 50 мас. % оксидов металлов, повышая его плотность, при этом MgO достигает до 20 мас. % [14, 15].

В таблице 1 представлены химический состав золы-уноса Рефтинской ГРЭС и химические составы стекол типов E и S, синтезированных на ее основе.

Таблица 1

Химические составы золы-уноса и синтезированных на ее основе стекол типа E и S

Тип стекла	Содержание оксидов, мас. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	Σ
ТО ТЭЦ	61,40	26,69	6,81	0,63	2,38	0,26	0,62	1,15	0,06	100
E	55,6	13,6	2,8	4,0	21,1	1,9	0,3	0,5	0,2	100
S	50,70	22,82	4,71	5,50	8,73	5,73	0,62	0,98	0,21	100

В опубликованных ранее результатах исследований по определению рациональности эффективного применения зол-уноса [10, 11] было отмечено, что в процессе лабораторной варки и выработки экспериментальных стекол, а также по-

следующей их термообработке наблюдался процесс их кристаллизации. Этот факт потребовал выполнения более детальных и разносторонних исследований этих процессов, поскольку именно

кристаллизация подавляюще определяет успешность волокнообразования и качество непрерывных волокон

В технологии стекловолокон [14, 15] вытягивание волокна происходит при определенном значении вязкости стекломассы, как правило, логарифм вязкости находится в пределах от 2,8 до 3, а температура расплава, соответствующая этой вязкости (температура выработки) должна быть минимум на 40°C выше, чем температура появления первых кристаллов (верхний предел кристаллизации), и процесс вытягивания волокна из расплава должен завершиться до появления первых кристаллов в стекле. Температура верхнего предела кристаллизации, установленная методом закалки, у синтезированного стекла Е составляет 1230 °C, у стекла S – 1330 °C [16]. Поскольку выработка стекловолокна происходит из расплава, то помимо температуры верхнего порога кристаллизации важно знать и состав первичной кристаллической фазы, чтобы иметь возможность скорректировать химический состав стекла при необходимости.

Одним из первичных способов определения состава кристаллических фаз и дальнейшего упрощения поиска пиков на рентгенограмме является исследование трехкомпонентной диаграммы состояния синтезированных стекол. Расположение экспериментальных составов стекол Е и S на диаграмме состояния системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ приведены на рисунке 1. На рисунке 2 приведено расположение экспериментального состава стекла S на диаграмме состояния системы $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

Состав стекла Е близок к эвтектическому составу с температурой плавления 1170°C, а первичной фазой являются кристаллы анортита, также возможно выделение кристаллов волластонита и тридимита. Анортит ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

плавится при 1553 °C и существует в трех модификациях: триклинной, ромбической и гексагональной. Гексагональная модификация образуется при кристаллизации стекла состава анортита при 1350 °C, а ромбическая – при 950 °C [12].

На кальцийалюмосиликатной диаграмме точка состава S находится в поле кристаллизации муллита с возможным появлением в ходе кристаллизации анортита и корунда. На магнийалюмосиликатной диаграмме состояния, которая является достаточно сложной из-за инконгруэнтного характера плавления тройных соединений, точка состава S располагается также в поле кристаллизации муллита. Составы, лежащие в поле кристаллизации муллита или шпинели, имеют более сложные пути кристаллизации.

Пограничные кривые между полями кристаллизации сапфирина-шпинели и муллита-кордиерита инконгруэнтны, а инвариантная точка с температурой 1482 °C между полями шпинели, муллита и сапфирина является точкой двойного опускания. По этому пути кристаллизации расплавов могут проходить две тройные инвариантные точки и заканчиваться в третьей. Путь кристаллизации его пойдет с выделением муллита, далее фазовые превращения пойдут по схеме: расплав муллит + жидкость муллит (растворяется) + кордиерит (образуется) + жидкость кордиерит + жидкость кордиерит + тридимит + жидкость (в точке эвтектики): кордиерит + тридимит + протоэнстатит + жидкость кордиерит + тридимит + протоэнстатит. Кристаллизация закончится в эвтектике при температуре 1355 °C. Таким образом, кристаллы муллита на пограничной кривой растворяются, и путь кристаллизации покинет пограничную кривую в точке исчезновения кристаллов муллита [12].



Рис. 3. Расположение экспериментальных составов стекол Е и S на диаграмме состояния $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

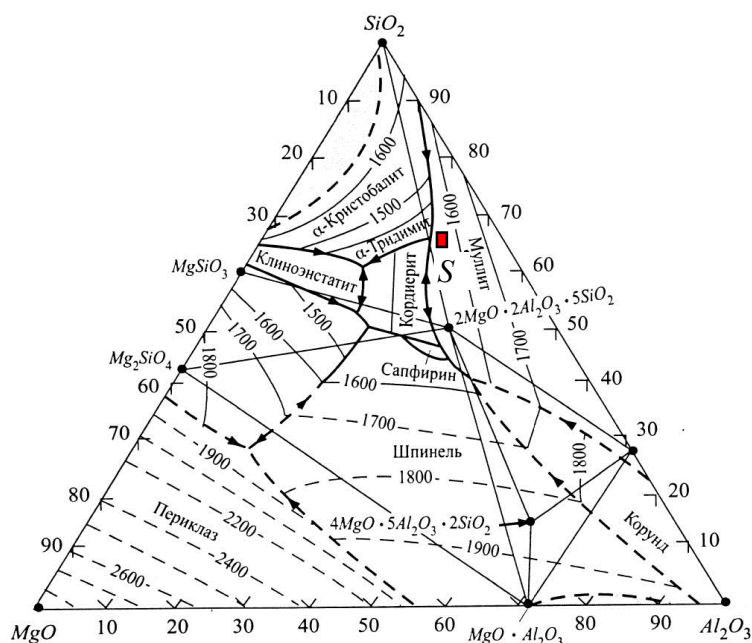


Рис. 2. Расположение экспериментального состава стекла S на диаграмме состояния $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

Кордиерит отличается сложным полиморфизмом. Одна из имеющих для нас значение полиморфная модификация получается при быстрой кристаллизации стекла состава 2:2:5 ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) при 1000–1300 °C, кристаллы имеют гексагональную симметрию; кордиерит ромбической сингонии получается при длительной кристаллизации стекол ниже 950 °C [12].

Необходимо заметить, что диаграмма состояния $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ рассчитана для равновесной кристаллизации, а при выработке непрерывного стекловолокна процессы кристаллизации далеки от равновесных, поэтому анализ возможной природы выделяющейся кристаллической фазы являлся априорным и требовал экспериментального изучения.

Процессы кристаллизации в стеклах, формы и размеры образующихся кристаллов, позволяющих идентифицировать продукты кристаллизации, уже давно исследовались при помощи электронной микроскопии, а возможность выполнения анализа элементного состава любой точки, находящейся в поле наблюдения в режиме реального времени существенно повысило точность и достоверность идентификации их природы.

На микрофотографиях (рис. 3) представлена структура стекла типа Е, термообработанного в течение 1 ч при температуре 1100 °C. Микрофотографии сделаны с различной степенью увеличения, что позволило детально изучить не только форму, но и определить элементный состав выкристаллизовавшейся фазы.

На микрофотографиях видно, что на фоне стекловидной фазы (области № 3, 4, 5, 7, 8, 11) наблюдаются участки с крупными кристаллами призматической формы (области № 1, 2, 6, 9, 13). Кристаллы такой формы относят к ромбической, моноклинической, триклинной сингониям низшей категории.

Из таблицы 2 видно, что кристаллы, имеющие призматическую форму (точки 1, 2, 6, 9, 12, 13), преимущественно состоят из оксидов кремния, кальция, магния, алюминия и имеют сходный с диопсидом $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ химический состав, мас. %: 25,9 CaO, 18,5 MgO; 55,6 SiO₂. Химический состав в точках № 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16 близок к химическому составу анортита $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, мас. %: 20,1 CaO; 36,7 Al₂O₃; 43,2 SiO₂. Не менее важным подтверждением приведенных доводов является и факт того, что анортит и диопсид образуют призматические кристаллы, что подтверждается приведенными на рисунке 3 микрофотографиями.

Заключительным действием по идентификации природы кристаллической фазы являются результаты рентгенофазового анализа. На рентгеновских порошковых дифрактограммах (рис. 4) термообработанного при 1100 °C стекла Е, имеются рефлексы, межплоскостное расстояние которых позволяет идентифицировать природу кристаллов, соответствующую алюмосиликатам кальция и магния, в частности диопсиду и анортиту (3.486, 3.215, 2.988, 4.049, 3.770, 3.215, 2.515).

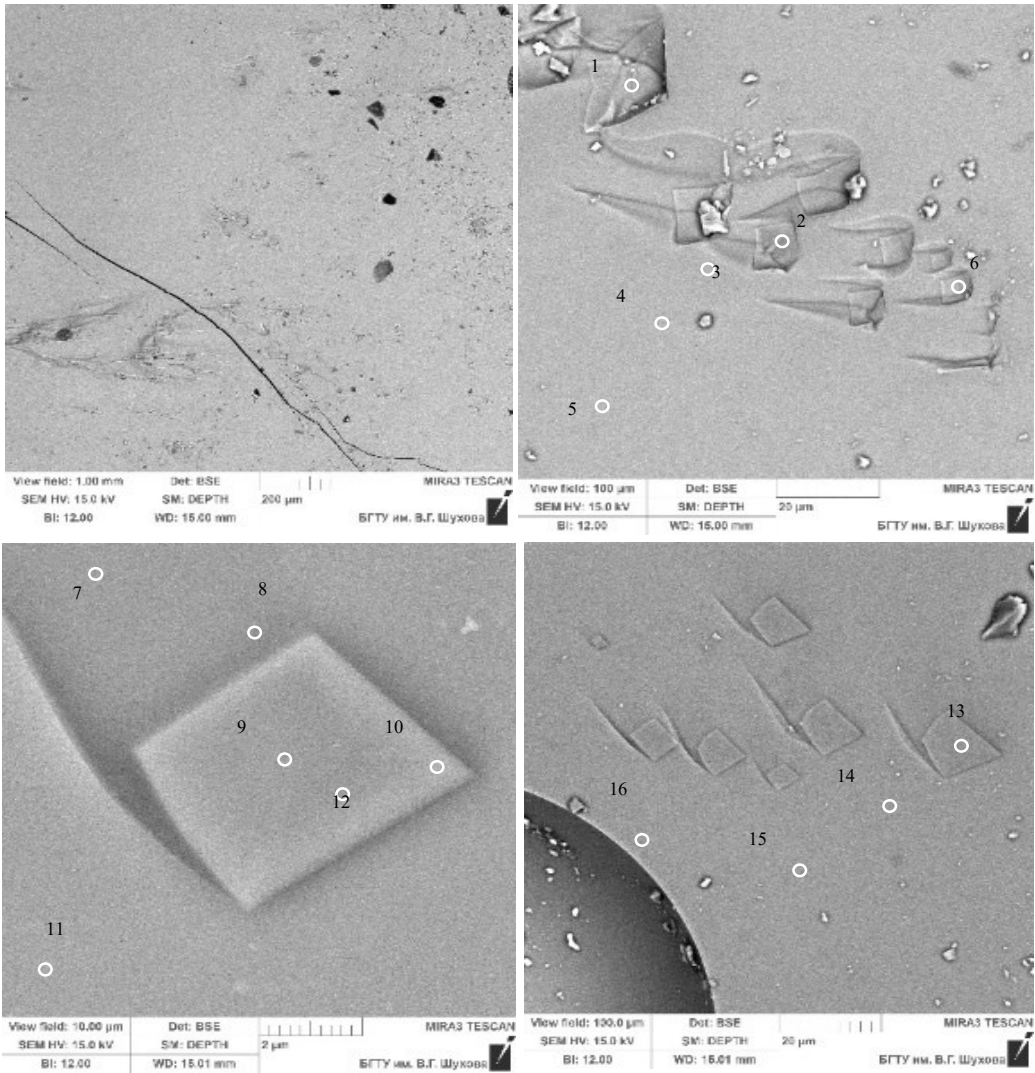
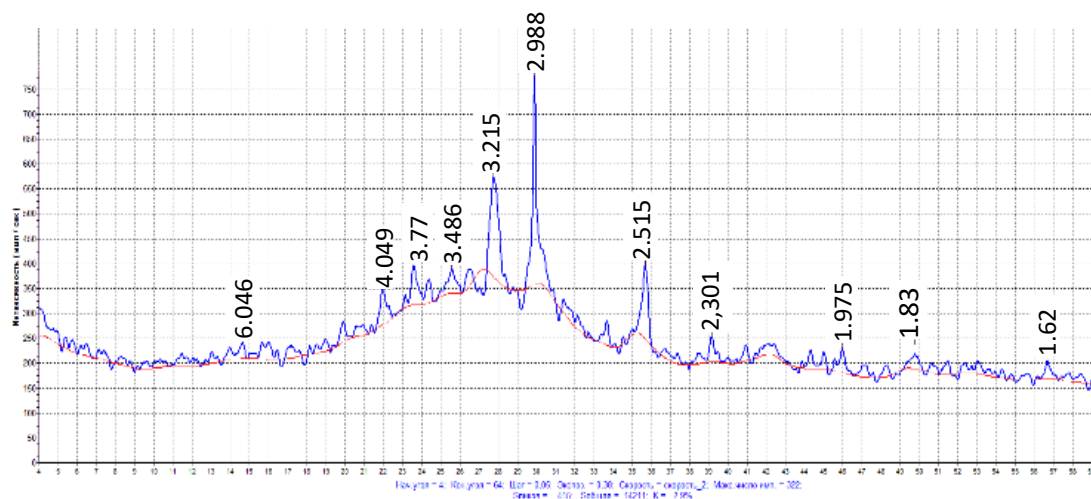


Рис. 3. Структура стекла Е, термообработанного при 1100°С

Таблица 2

Элементный и оксидный составы точек, отмеченных на микрофотографиях стекла Е, термообработанного при 1100 °С

Точки составов	Вид выражения состава в поле наблюдения									
E1100. № 1, 2, 6, 9, 12, 13	Элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	4,80	45,00	0,18	8,23	3,37	21,43	-	15,13	0,43	1,38
	Оксидный состав, мас. %									
	-	-	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	-	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
	-	-	0,49	13,8	12,7	45,8	-	21,2	0,72	3,94
E1100. № 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16	Элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	5,77	47,67	1,68	1,38	7,20	23,18	0,28	11,44	0,25	1,15
	Оксидный состав, мас. %									
	-	-	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
	-	-	3,75	3,62	26,14	50,71	0,65	18,11	0,45	3,80



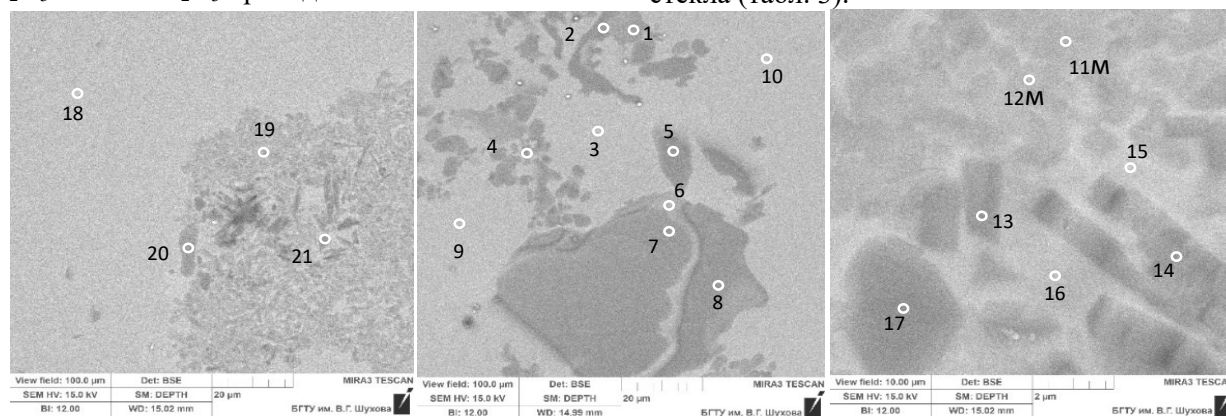
В стеклах типа Е, синтезированных в поле эвтектик систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, основной кристаллической фазой является анортит. При добавлении в состав более 2 % MgO первичная фаза появляется в форме диопсида; анортит в этом случае является вторичной фазой. При увеличении содержания CaO на 2 % в стекле эвтектического состава, мас. %: 23,3 CaO ; 14,7 Al_2O_3 ; 62,0 SiO_2 в качестве первичной фазы кристаллизуется волластонит.

Стекла типа Е должны быть близкими по составу к эвтектике тридимит-волластонит-анортит и содержать не более 2,0 % MgO, при значительном смещении из эвтектической области состав первичной кристаллической фазы изменяется от диопсида к анортиту, волластониту и при увеличении содержания кремнезема к кристобалиту. Стекла с кристаллами кристобалита очень хрупкие, что при выработке волокна приводит к высокой обрывности. Для стекол на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ при смещении из эвтектической области, замена CaO на MgO до 5 % или на Al_2O_3 до 3 %, а также добавка к стеклам 2–3 % MgO, Al_2O_3 или 5 % B_2O_3 приводит к снижению темпе-

ратуры ликвидуса. Вместе с тем при введении более 5 % MgO первичной фазой кристаллизации является энстанит ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) и диопсид, которые обладают большой скоростью роста [14].

На микрофотографиях стекла Е (рис. 5), термообработанного при 1200 °С, наблюдается процесс постепенной аморфизации кристаллов за счет их расплавления, сопровождающийся «размытием» граней как крупных (до 40 мкм), так и мелких (до 5 мкм) кристаллов различной формы. При этом наблюдается увеличение площади, занимаемой стеклофазой, что подтверждается видом рентгеновской порошковой дифрактограммы (рис. 6), представленной аморфным галло, а одиночный пик с межплоскостным расстоянием 2,163 Å не позволяет идентифицировать природу оставшегося кристаллического включения.

По химическому составу остаточные кристаллы можно разделить на две группы: обогащенные алюминием и кремнеземом, и группу кристаллов, имеющих химический состав, приближенный к составу анортита и составу самого стекла (табл. 3).



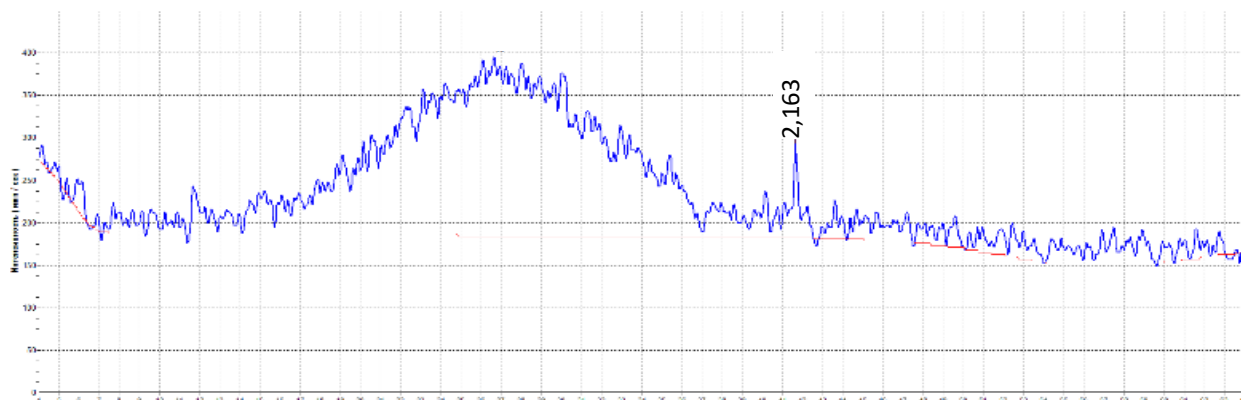


Рис. 6. Порошковая рентгеновская дифрактограмма стекла Е, термообработанного при 1200 °С

Таблица 3

Элементный и оксидный составы точек, отмеченных на микрофотографиях стекла Е, термообработанного при 1200 °С

Точки составов	Вид выражения состава в поле наблюдения									
E1200. № 2, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 17, 20, 21	Усредненный элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	4,47	48,21	2,00	0,64	12,94	21,48	0,11	9,35	0,19	0,82
	Усредненный оксидный состав, мас. %									
	-	-	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
E1200. № 1, 3, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18	-	-	4,6	0,91	41,73	39,1	0,23	11,17	0,27	2,0
	Усредненный элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	4,25	47,37	1,29	1,88	7,67	22,23	0,21	12,29	0,27	2,45
	Усредненный оксидный состав, мас. %									
	-	-	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
	-	-	3,25	2,92	26,2	44,29	0,47	16,03	0,4	6,54

Скорее всего, в стеклах Е остаточной кристаллической фазой при 1200 °С являются частично аморфизированные алюмосиликаты, наиболее вероятно представленные анортитом, а также смесью минералов – муллита, силлимита, кианита.

В отличие от стекла Е, термообработанное при 1200 °С стекло S имеет развитую кристаллическую структуру, то есть представляет собой стеклокристаллический материал с тонкозернистой структурой и небольшими участками аморфной стеклофазы; кристаллы в поле наблюдения имеют размеры в диапазоне 0,5–3,0 мкм (рис. 7), характеризуются октаэдрической и додекаэдрической формой и образуют кристаллические сростки и друзы.

Химический состав кристаллов (табл. 4) представлен оксидами магния, алюминия и железа, что свойственно шпинелям. Высокое содержание

количества железа так же позволяет предположить нахождение в кристаллической фазе минералов с высоким содержанием оксидов железа – магнетита, гематита, лимонита, гетита или сидерита. Не исключается и то, что часть минеральной фазы может быть представлена алюмосиликатами изоморфного ряда плагиоклазов – альбит Na(AlSi₃O₈)-анортит Ca(Al₂Si₂O₈).

С целью сравнительной оптической идентификации кристаллов, используемой при петрографическом анализе минералов, приводятся фотографии внешнего вида кристаллов [17] магнетита, кордиерита, анортита и альбита (рис. 8).

Из приведенных фотографий (рис. 8) видна схожесть форм кристаллов предполагаемых минералов с формой идентифицируемых кристаллов. Вместе с тем необходимо отметить, что в поле наблюдения не все кристаллы имеют октаэдрическую форму; некоторые кристаллы (точки 10 и 11, рис. 7) имеют размытую форму граней.

Не менее интересной являлась идентификация фазы гетерогенной системы, элементный и

химический состав которой отмечен точками 1, 5, 6, 9 (рис. 7).

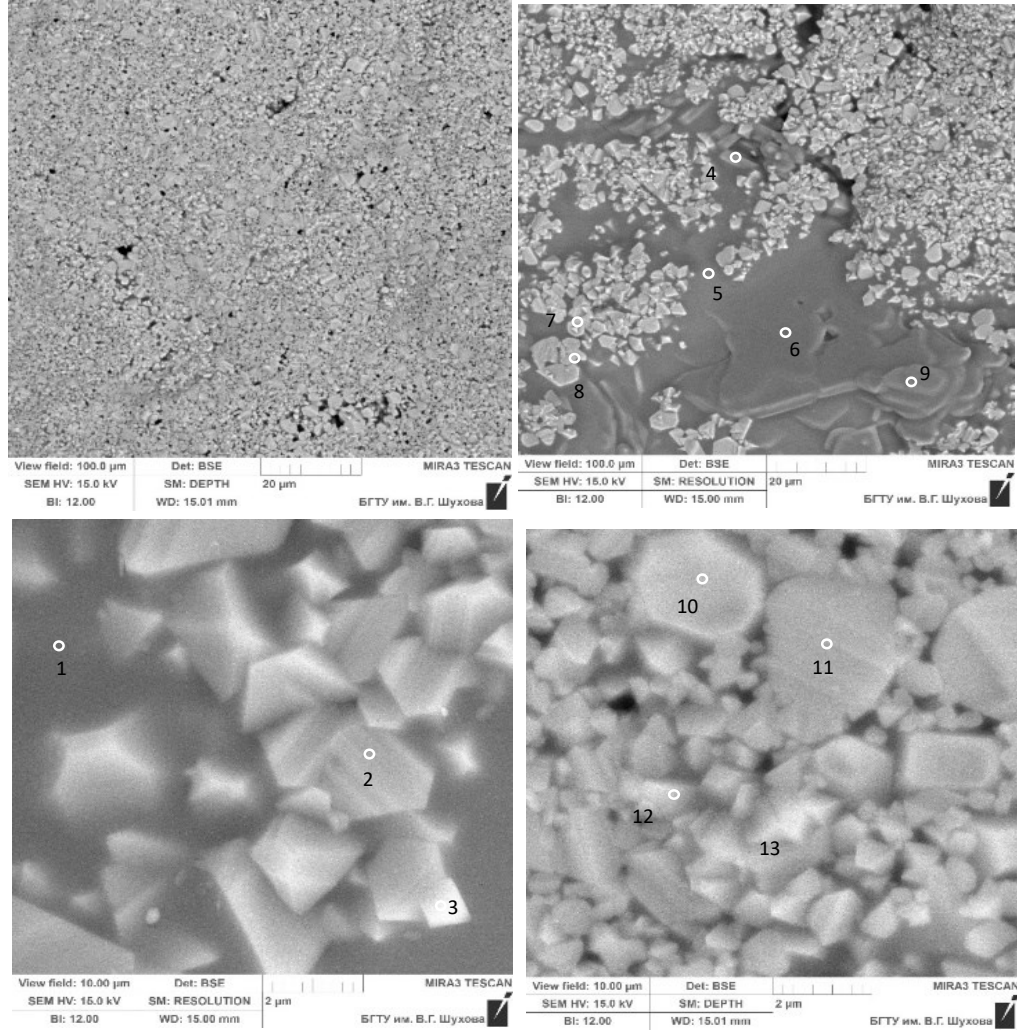


Рис. 7. Структура стекла S при термообработке 1200 °С

Таблица 4

Элементный и оксидный составы точек, отмеченных на микрофотографиях стекла S, термообработанного при 1200 °С

Точки составов	Вид выражения состава в поле наблюдения									
S1200. № 2, 10, 11, 13	Усредненный элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	5,48	39,68	0,17	12,85	14,79	0,43	—	0,13	0,31	26,16
	Усредненный оксидный состав, мас. %									
	—	—	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
S1200. № 1, 5, 6, 9	—	—	0,27	24,19	32,15	1,09	—	0,20	0,58	41,53
	Усредненный элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	5,71	47,56	3,77	2,13	11,25	20,38	0,49	5,18	0,52	3,02
	Усредненный оксидный состав, мас. %									
	—	—	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
	—	—	5,79	4,06	24,48	50,76	0,67	8,34	0,98	4,92

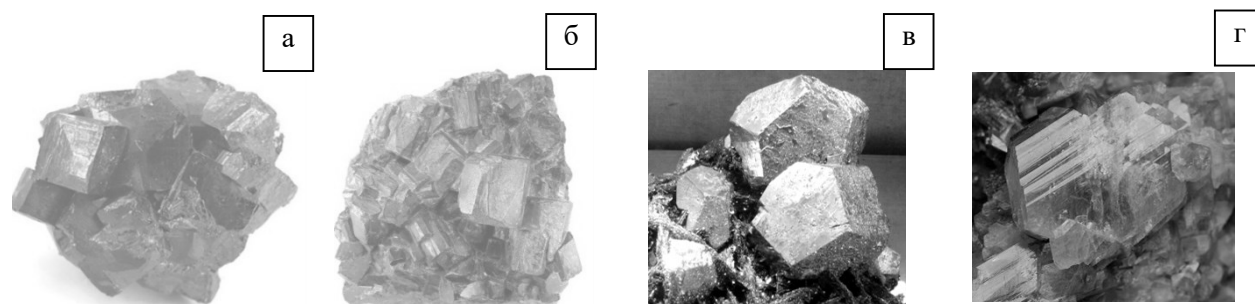


Рис. 8. Фотографии кристаллов магнетита (а), кордиерита (б), анортита (в), альбита (г)

Так, в поле наблюдения усредненный химический состав точек 1,5,6 и 9 (рис.7), представлен, масс. %: 50,76 SiO₂; 0,98 TiO₂; 24,48 Al₂O₃; 4,92 Fe₂O₃; 8,33 CaO; 4,06 MgO; 5,79 Na₂O; 0,67 K₂O. Такое содержание оксидов весьма схоже с составом кордиерита – циклосиликатом магния, железа, алюминия – Al₃(MgFe)₂[Si₅AlO₁₈]. Железо присутствует почти всегда, и существует твердый раствор богатого магнием (Mg) кордиерита и богатого железом (Fe) секанинита с формулой ряда от (Mg,Fe)₂Al₃(Si₅AlO₁₈) к (Fe, Mg)₂Al₃(Si₅AlO₁₈) [18]. Химический состав кордиерита имеет значительные колебания оксидов в пределах, мас. %: 43,27–51,36 SiO₂; 29,96–35,6 Al₂O₃; 1,48–13,68 MgO; до 15,31 FeO и до 9,94 Na₂O.

Необходимо отметить, что класс симметрии кордиерита определяется как ромбо-бипирамидальный, то есть формы кристаллов кордиерита представляют собой октаэдр, следовательно, являются подобными кристаллам магнетита. Кристаллы альбита и анортита имеют триклинную сингонию, и в поле наблюдения такие кристаллы также имеют место.

Петрографическая идентификация минеральной фазы в стеклокристаллических материалах, даже при наличии сведений о химическом

(элементном) составе определенных точек в поле наблюдения никогда не может быть исчерпывающей и объективной. Именно поэтому для достоверной идентификации используется третий вид исследования – рентгенофазовый анализ, обеспечивающий получения максимально возможной достоверности минеральной природы идентифицируемой фазы.

Расшифровка рентгеновской порошковой дифрактограммы (рис. 9) при помощи кристаллографической и кристаллохимической Базы данных для минералов и их структурных аналогов [19] показала, что минеральная фаза, выкристаллизовавшаяся в стекле S после термообработки при температуре 1200 °C, представлена несколькими кристаллическими фазами – минералами непрерывного изоморфного ряда альбит-анортит: лабрадоритом (3.177, 3.2, 4.04, 3.2, 3.14), альбитом (4.04, 3.17, 3.2, 3.75, 3.22) и анортитом (3.19, 3.178, 3.26, 4.038, 3.209). Также в смеси указанных минералов имеют место примеси, кристаллы которых содержат значительное количество железа, представляющие собой, предположительно, магнетит (2.53, 2.524, 1.48, 2.964, 2.527) гематит (2.7, 2.519, 1.696, 1.842, 1.487) или гетит (4.19, 2.44, 2.69, 1.719, 1.56).

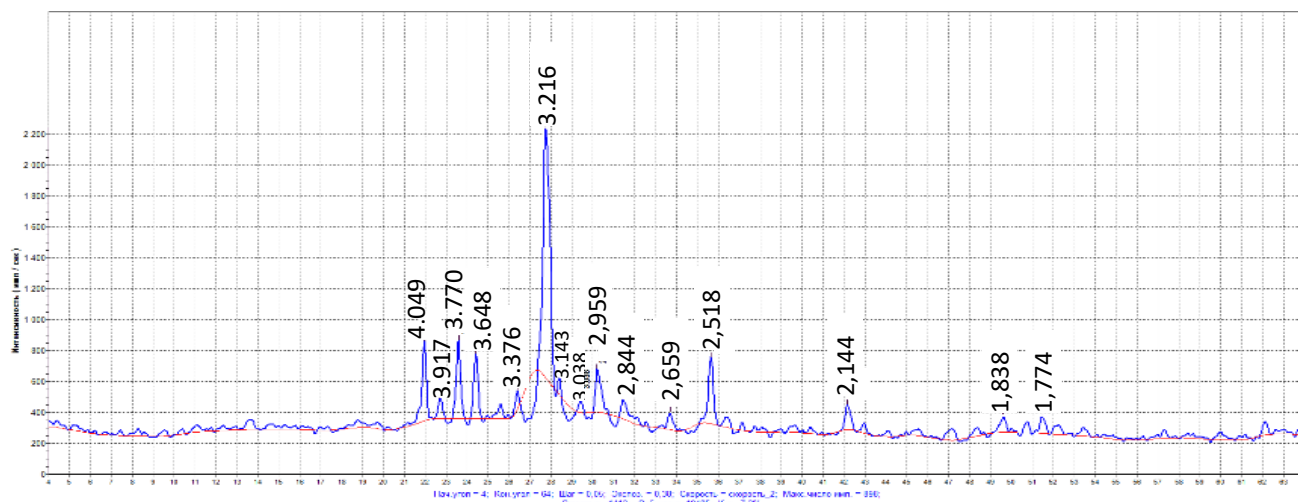


Рис. 9. Порошковая рентгеновская дифрактограмма стекла S, термообработанного при 1200 °C

Также необходимо отметить, что предположение о том, что в составе кристаллической фазы имеет место кордиерит, не подтвердилось, поскольку в большинстве CPDS карт различных структурных типов кордиерита [19] межплоскостное расстояние (d) основного рефлекса (интенсивность 100 %) составляет 8,46 Å.

На микрофотографиях стекла S, термообработанного при 1300 °C (рис. 10) крупных кри-

сталлов с четкими гранями и формой не наблюдается, и если говорить о кристаллизации «снизу», то есть при последовательном повышении температуры, то можно уверенно говорить о протекании процесса плавления кристаллической фазы с переходом в аморфизированное состояние, что подтверждается видом порошковой рентгеновской дифрактограммы (рис. 11), на которой отмечаются остаточные рефлексы минералов изоморфного ряда альбит-анортит (3.215, 3.357, 3.783).

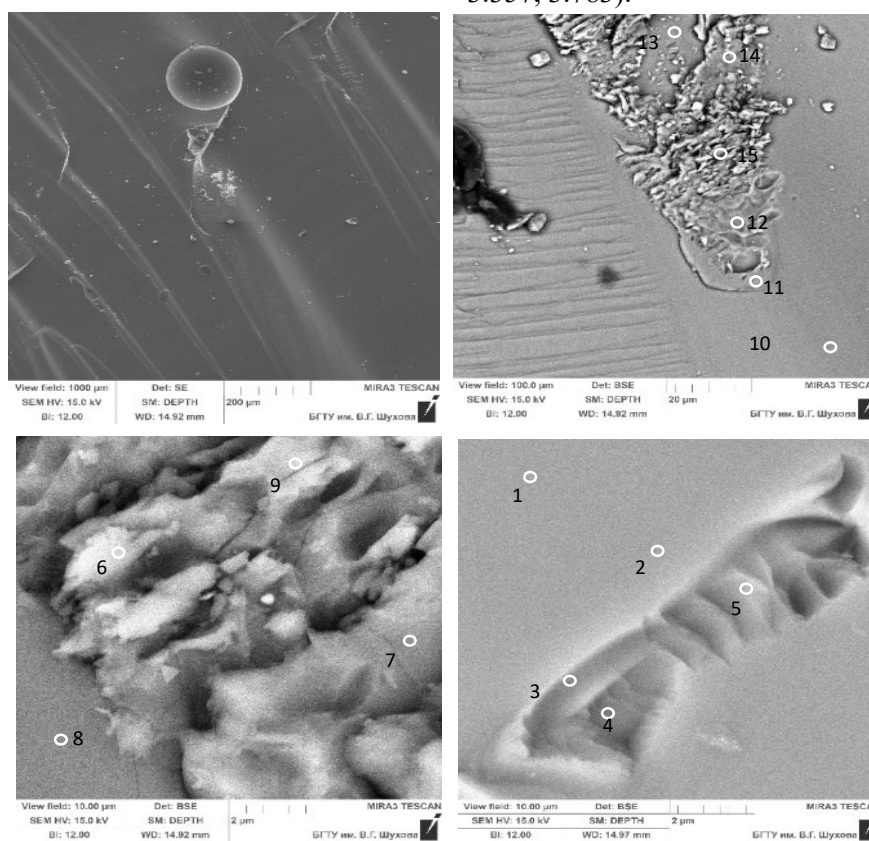


Рис. 10. Структура стекла S при термообработке 1300 °C

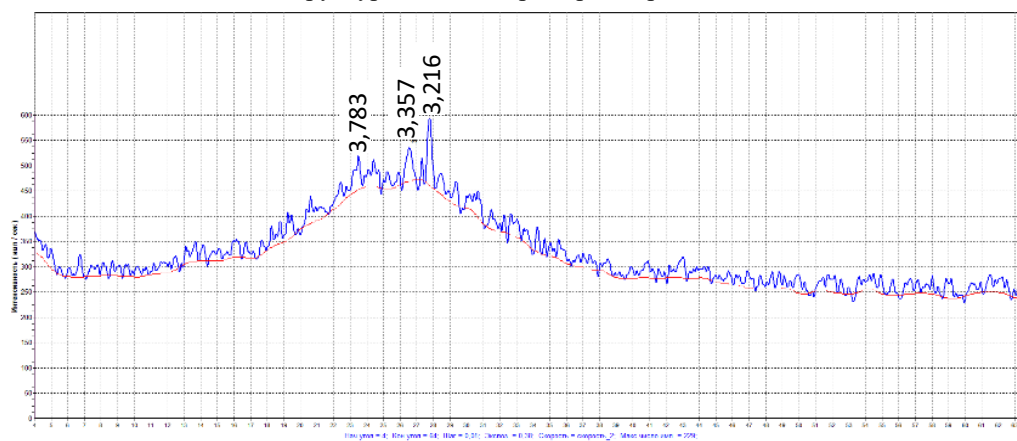


Рис. 11. Рентгеновская порошковая дифрактограмма стекла S, термообработанного при 1300 °C

Изучение химического состава кристаллической и аморфной стеклофазы, приведенных в оксидном виде (табл. 5), показало близость составов в точках подобных областей, приведенных на

рисунке 7 и химического состава стекла S (табл. 1).

Таблица 5

Элементный и оксидный составы точек, отмеченных на микрофотографиях стекла S, термообработанного при 1300 °С

Точки составов	Вид выражения состава в поле наблюдения									
S1300. № 3, 4,5, 6, 7, 9, 15	Усредненный элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	5,48	39,68	0,17	12,85	14,79	0,43	–	0,13	0,31	26,16
	Оксидный состав, мас. %									
	–	–	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
S1200. № 1,2, 8, 10,11, 13	–	–	0,25	24,17	32,11	1,12	–	0,22	0,62	41,51
	Элементный состав, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
	6,07	46,87	3,62	2,81	10,77	21,00	0,44	5,56	0,54	2,32
	Оксидный состав, мас. %									
	–	–	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
	–	–	5,56	5,35	23,15	51,62	0,60	8,95	1,01	3,76

Выводы. Анализ результатов проведенных исследований позволяет говорить о том, что интервалы кристаллизации стекол типов Е и S, полученных на основе техногенных отходов ТЭЦ определены, а продукты кристаллизации в установленных интервалах температур достоверно идентифицированы.

Полученные результаты обеспечивают понимание того, при каких температурах необходимо реализовывать процесс формования стекловолокон типов Е и S с высоким коэффициентом использования стекломассы при использовании техногенных отходов ТЭЦ в промышленном производстве. Так, температурный интервал формования стекловолокна типа Е может иметь значения 1200...1240 °С, а для стекол типа S – 1300...1340 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ферхат К. Стекловолокно: его свойства и применение // Молодой ученый. 2019. №6 (244) С. 14–16.
2. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №. 6-7 (89). С. 29–37. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
3. Малая Е.В., Савин А.И. Композиционные материалы в современной авиации // Актуальные исследования. 2020. №49 (128). Ч.1. С. 6–9.
4. Сенюшкин Н.П., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Л.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА // Молодой ученый. 2011. №4 (27). Т.1. С. 59–61.
5. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевых сплавов в авиационных конструк-

циях нового поколения // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 19 июля 2021 г.). ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2021. 315 с.

6. Стеклонаполненные полимерные композиционные материалы [Электронный ресурс] URL: <https://extxe.com/30122/steklonapolnennye-polimernye-kompozicionnye-materialy/> (дата обращения 25.09.23)

7. Усиление конструкций композиционными материалами [Электронный ресурс] URL: https://itexn.com/5179_usilenie-konstrukcij-kompozitnymi-materialami.html (дата обращения 25.03.23)

8. Кракович И.А. Обзор композитных материалов для усиления железобетонных конструкций // Молодой ученый. 2020. №20(310). С. 115–117.

9. Бандалетова Л.И., Бандалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1). Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2013. 118 с.

10. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №. 5. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81

11. Лазарова Ю.С. Новое сырье для производства стекловолокна // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2023. С.108–113.

12. Эйтель В. Физическая химия силикатов/ Пер. с нем. И.В. Беккера, В.Г. Воано, А.А. Александровского; Под ред. проф. Д. С. Белянкина. - Ленинград : Онти. Химтеорет, 1936. 560 с.

13. Вегман Е.Ф., Руфанов Ю.Г., Федорченко И.Н. Кристаллография, минералогия, петрография и рентгенография. Металлургия, 1990. 262 с.

14. Асланова М.С., Колесов Ю.И., Хазанов В.Е., Ходаковский М.Д., Шейко В.Е.. Стекланные волокна. М.: Химия. 1979. 256 с.

15. Wallenberger F.T., Watson J.C., Li Hong. Glassfibers // ASM Handbook. 2000. No. 21. Pp. 27–34.

16. Лазарова Ю.С. Исследование процесса кристаллизации стекол для непрерывного стекловолокна, синтезированных на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС // Международная научно-техническая конференция молодых уче-

ных БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. Белгород, 2022. С.119-125.

17. Магнетит/ [Электронный ресурс] URL: https://ya.ru/images/search?source=related&duck&text=Магнетит+минерал+Кристаллы&pos=0&rpt=simage&img_url=https%3A%2F%2F1.wp.com%2Ffb.ru%2Fmisc%2Fi%2Fgallery%2F92214%2F2531467.jpg&lr=4(дата обращения 17.10.2023)

18. Минералогическая энциклопедия – mineralix. [Электронный ресурс] URL: <https://mineralix.ru/?ysclid=lopnlxh1g180118697http://mincryst.iem.ac.ru/rus/>(дата обращения 17.10.2023)

19. Кристаллографическая и кристаллохимическая Базы данных для минералов и их структурных аналогов. [Электронный ресурс] URL: <http://mincryst.iem.ac.ru/rus/>(дата обращения 17.10.2023)

Информация об авторах

Онищук Виктор Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: v.onishchuk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лазарова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. Младший научный сотрудник АО «НПО СТЕКЛОПЛАСТИК». E-mail: juliaismee@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Прохоренков Дмитрий Станиславович, научный сотрудник ЦБТ. E-mail: bstu-cvt-sem@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Линец Валентин Владимирович, магистрант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: v.v.l.comrade@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.11.2023 г.

© Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Прохоренков Д.С., Фанина Е.А., Линец В.В., 2023

^{1,*}*Onishchuk V.I.*, ^{1,2}*Lazarova Yu.S.*, ¹*Prokhorenkov D.S.*, ¹*Linets V.V.*

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

²*JSC "SPA FIBERGLASS"*

^{*}*E-mail: v.onishchuk@mail.ru*

IDENTIFICATION OF GLASS CRYSTALLIZATION PRODUCTS FOR THE PRODUCTION OF FIBERGLASS OBTAINED BASED ON MAN-MADE WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS

Abstract. Achieving technological sovereignty in the field of production of composite materials today requires a rapid increase in production volumes of special-purpose glass fibers. At the same time, scientific solutions in this area must be effective, both from a technological and economic point of view. The article presents research results that form an idea of the possibility of using technogenic waste from thermal power

plants in the industrial production of electrical insulating and high-modulus glass fibers. Since the technological efficiency of fiber formation is largely determined by the tendency of melts to crystallize, most of the research was aimed at studying the crystallization process, determining the temperature range of crystallization and identifying the nature of crystallization products. It has been established that in the temperature range of 1100–1200 °C the crystallization products are represented by diopside and anorthite, which, with increasing temperature, undergo amorphization and subsequent dissolution in the glass phase. In glass S, the products of crystallization in the temperature range 1200–1300°C are represented by minerals of the continuous isomorphic series albite-anorthite and an insignificant content of ferruginous minerals – magnetite, hematite or goethite. The data obtained will make it possible to develop rational parameters for the process of forming glass fibers or methods for suppressing such an undesirable phenomenon for technology as crystallization in the molding range.

Keywords: glass fibers, compositions, state diagrams, crystallization, crystallization products, identification.

REFERENCES

1. Ferkhat K. Fiberglass: its properties and application. [Steklovolokno: ego svoistva i primeneniye]. A young scientist. 2019. No. 6. Pp.14–16. (rus)
2. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review) [Rossiiskii i mirovoi rynek polimernykh kompozitov (obzor)]. roceedings of VIAM. 2020. No. 6-7. Pp. 29–37. (rus). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37
3. Malaia E.V., Savin A.I. Composite materials in modern aviation. [Kompozitsionnye materialy v sovremennoi aviatsii]. Current research. 2020. No.49. Part 1. Pp.6–9. (rus)
4. Seniushkin N.P., Iamaliev R.R., Alchibaeva L.R. Application of composite materials in UAV design [Primeneniye kompozitsionnykh materialov v konstruktii BPLA]. A young scientist. 2011. No.4. Vol.1. Pp. 59–61. (rus)
5. Serebrennikova N.Iu., Antipov V.V., Nefedova Iu.N. Prospects of application of laminated aluminum-fiberglass based on aluminum-lithium alloys in new generation aircraft structures. [Perspektivy primeneniia sloistykh aliumostekloplastikov na osnove aluminii-litievnykh splavov v avia-tsionnykh konstruktiiakh novogo pokoleniia]. AdodeAcrobatReader. URL:<https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1353.pdf> (date of treatment 25.09.2023)
6. Glass-filled polymer composite materials [Steklonapolnennye polimernye kompozitsionnye materialy]. URL: [https://exte.com/30122/steklonapolnennye-polimernye-kompozitsionnye-materialy/\(date of treatment 25.09.2023\)](https://exte.com/30122/steklonapolnennye-polimernye-kompozitsionnye-materialy/(date%20of%20treatment%2025.09.2023))
7. Reinforcement of structures with composite materials [Usilenie konstruktii kompozitsionnymi materialami]. URL: https://itexn.com/5179_usilenie-konstrukcij-kompozitnymi-materialami.html(date of treatment 25.03.2023)
8. Krakovich I.A. Review of composite materials for reinforcement of reinforced concrete structures. [Obzor kompozitnykh materialov dlia usileniia zhelezobetonnykh konstruktii]. A young scientist. 2020. No. 20. Pp. 115–117.
9. Bandaletova L.I., Bandaletov V.G. Polymer composite materials (part 1). [Polimernye kompozitsionnye materialy (chast' 1)]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2013. 118 p. (rus)
10. Onishchuk V.I., Lazarova Iu.S., Evtushenko E. I.Assessment of the possibility of using Reftinskaya GRES ash in the production of continuous fiberglass [Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniia zoly Reftinskoi GRES v proizvodstve nepreryvnogo steklovolokna]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 71–81. DOI:10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81
11. Lazarova Iu.S. New raw materials for the production of fiberglass. [Novoe syr'e dlia proizvodstva steklovolokna]. In the collection: International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhova BSTU. 2023. Pp.108–113. (rus)
12. Eitel' V. Physical chemistry of silicates. [Fizicheskaiia khimiia silikatov]. Leningrad:Onti. Himteoret, 1936. 560 p.(rus)
13. Vegman E.F., Rufanov Iu.G., Fedorchenko I.N. Crystallography, mineralogy, petrography and radiography. [Kristallografiia, mineralogiia, petrografiia i rentgenografiia. Metallurgiiia.]. Moscow, 1990, 262 p.(rus)
14. Aslanova M.S., Kolesov Iu.I., KHazanov V.E., KHodakovskii M.D., SHEiko V.E..Glass fibers. [Stekliannye volokna]. Moskva: Chemistry, 1979. 256 p.(rus)
15. Wallenberger F.T., Watson J.C., Hong L. Glassfibers. ASMHandbook. 2000. No. 21. Pp. 27–34.
16. Lazarova Iu.S. Investigation of the crystallization process of glasses for continuous fiberglass synthesized on the basis of fly ash Reftinskaya GRES. [Issledovanie protsesssa kristallizatsii stekol dlia nepreryvnogo steklovolokna, sintezirovannykh na osnove zoly-unosa Reftinskoi GRES]. In the collection: International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU,

dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Collection of reports of the National Conference with international participation. 2022. Pp. 119–125. (rus)

17. Magnetite. [Magnetit]. URL: https://ya.ru/images/search?source=related-duck&te-xt=magnetite+mineral+crys-tals&pos=0&rpt=simage&img_url=https%3A%2F%2Fi1.wp.com%2Ffb.ru%2Fmisc%2Fi%2Fgallery%2F92214%2F2531467.jpg&lr=4(date of treatment 17.10.2023)

18. Mineralogical encyclopedia – mineralix. [Mineralogicheskaja entsiklopediia – mineralix]. URL: <https://mineralix.ru/?ysclid=lopnulxh1g180118697http://mincryst.iem.ac.ru/rus/>(date of treatment 17.10.2023)

19. Crystallographic and crystal chemical databases for minerals and their structural analogues. [Kristallograficheskaja i kristallokhimicheskaja Bazy dannykh dlia mineralov i ikh strukturnykh analogov]. URL: <http://mincryst.iem.ac.ru/rus/>(date of treatment 17.10.2023)

Information about the authors

Onishchuk, Viktor I. PhD, Professor. E-mail: v.onishchuk@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Prokhorenkov, Dmitry S. Research engineer of the Center for High Technologies. E-mail: bstu-cvt-sem@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Linets, Valentin V. Master student. E-mail: v.v.l.comrade@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 21.11.2023

Для цитирования:

Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Прохоренков Д.С., Фанина Е.А., Линец В.В. Идентификация продуктов кристаллизации стекол для производства стекловолокна, полученных на основе техногенных отходов ТЭЦ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 83–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-83-96

For citation:

Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Prokhorenkov D.S., Fanina E.A., Linets V.V. Identification of glass crystallization products for the production of fiberglass obtained based on man-made waste from thermal power plants. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 83–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-83-96

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-97-105

^{1,*}Мишин Д.А., ¹Дороганов В.А., ¹Долгова Е.П., ¹Таралло З.В., ¹Евтушенко Е.И.,
²Лукин Е.С.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

*E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru

СПОСОБЫ СИНТЕЗА СИЛИКАТСОДЕРЖАЩЕГО КЛИНКЕРА СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕМЕНТА

Аннотация. Статья представляет обзор современных цементах, используемых в стоматологии с акцентом на силикатные цементы, такие как минеральный триоксидный агрегат (МТА). Приводятся основные требования к стоматологическим цементам, включая их безопасность, адгезию к тканям зуба, устойчивость к различным воздействиям и термическим свойствам.

Статья детально анализирует состав и свойства промышленного белого портландцемента, используемого в строительстве, в сравнении с характеристиками зубных силикатных цементах. Рассматриваются общие вопросы синтеза высокосновных силикатов кальция, используемых в стоматологии, с позиций химической технологии портландцемента. Обсуждаются минералогический состав и процессы гидратации различных компонентов цемента, их влияние на окраску зубов и другие свойства.

Указаны способы снижения температуры и увеличения скорости образования силикатов кальция, распространенные в технологии зубных цементах и в производстве портландцемента. Предполагается возможность ускорения твердофазового синтеза в интервале 1250–1350°C при особом способе введения минерализаторов, предложенном в БГТУ им. В.Г. Шухова для синтеза белого портландцемента, при условии его адаптации для стоматологических составов.

Ключевые слова: стоматологические цементы, клинкерные минералы, минерализаторы, твердофазный синтез силикатов, стоматология.

Введение. В стоматологической практике наблюдается обширное многообразие видов используемых цементах (рис. 1), связанное с различными условиями их работы.



Рис. 1. Классификация стоматологических цементах по химическому составу [1]

Примечание: ПКЦ* – поликарбоксилатные цементы; СИЦ* – стеклоиономерные или стеклополиалкенатные цементы

Стоматологические цементы должны удовлетворять следующим основным требованиям [2, 3]:

1) не оказывать токсического воздействия на окружающие ткани и при этом обладать противовоспалительным и антисептическим действием;

2) обладать высокой адгезией к тканям зуба, достаточной вязкостью для заполнения каналов без пропусков, отсутствием усадки, устойчивостью к тканевой жидкости, рентгеноконтрастностью, не окрашивать зуб;

3) иметь коэффициент термического расширения (КТР) близкий к значениям КТР тканей зуба, низкую теплопроводность, не вызывать гальванических токов.

Выполнить все требования одновременно в одном материале сложно, в связи с чем у каждого вида цемента есть преимущества и недостатки.

Данная статья рассматривает некоторые аспекты получения силикатных стоматологических цементов, используемых для пломбировки

корневых каналов, на примере минерального триоксидного агрегата (МТА) [4, 5] с позиций химической технологии производства строительных цементов.

Возможность обобщенного подхода к синтезу обусловлена тем, что качественный и количественный минералогический составы силикатного стоматологического цемента и белого строительного портландцемента очень близки. Целью предложенного анализа особенностей получения высокоосновных силикатов кальция является межотраслевой обмен накопленного опыта и научных данных.

Материалы и методы. Для исследования были использованы диоксид кремния марки БС-100 (белая сажа), кварц плавленный ПКС-95С, химически осажденный CaCO_3 . Сырьевые компоненты характеризуются низким содержанием примесных оксидов (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сырьевых компонентов (по паспортам качества), %

Компонент	CaCO_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO
Химически осажденный CaCO_3	99,05	0,12	0,08	–	–
БС-100 (белая сажа)	–	98	0,03	0,01	0,1
ПКС-95С (кварц плавленный)	–	>99,75	0,031	0,41	–

Гранулометрические характеристики исходных сырьевых компонентов определяли на лазерном гранулометре ANALYSETTE 22 NanoTec plus (рис. 1). Диспергацию материалов проводили в дистиллированной воде. Из сырьевых компонентов наибольшей тониной обладает химически осажденный мел. У него максимальный размер частицы 27,9 мкм. Для протекания синтеза необходимо, чтобы размер частиц кремнийсодержащих компонентов был минимален. При обжиге портландцементных сырьевых смесей тонина помола сырьевой смеси должна составлять

по остаткам: на сите №02 – не более 5 %, на сите №008 – не более 15 %. Расчет сырьевых смесей проводили в программе ROCS, разработанной в БГТУ им. В.Г.Шухова. Цель расчета – получить минералогический состав, близкий к 80 % $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) и 20 % $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S). Так как сырьевые компоненты имеют незначительные примеси, то наблюдается отклонение от целевого состава смесей (табл. 2)

Таблица 2

Характеристика сырьевых смесей и расчетный минералогический состав продуктов обжига вяжущего, %

№ п.п.	Компоненты сырьевой смеси			Минералы			Модульные характеристики		
	Хим.осажденный CaCO_3	БС-100	ПКС-95С	C_3S	C_2S	C_3A	КН	Силикатный модуль (n)	Глиноземный модуль (p)
1	80,83	19,68	–	76,09	19,68	0,16	0,92	453,8	0
2	82,36	–	17,65	78,32	20,26	0,09	0,915	773,2	0

Гомогенизацию сырьевых смесей №1 и №2 проводили в мельнице с добавлением воды 40 % в течение 30 минут.

Полноту синтеза вяжущего контролировали определением свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) в продукте обжига этил-глицератным методом.

Обжиг смесей проводили в электрической печи с хромитлантановыми нагревателями при температуре 1500 °С с изотермической выдержкой 60 минут.

Основная часть. Производство стоматологических силикатных цементов сопряжено со значительными энерго- и трудозатратами, а также низкой скоростью твердофазового синтеза

$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) и $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S). Так, согласно [6] получение триклинного $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ из смеси порошков высокочистого кварца и CaCO_3 в стехиометрическом отношении 1:3 осуществляется путем гомогенизации сырьевой смеси в воде, сушки полученного шлама при 100°C , последующего обжига при 1650°C в течение 5 ч и быстрого охлаждения. Процедуру обжига повторяют до тех пор, пока рентгеновский дифракционный анализ не покажет отсутствие в материале свободного CaO . Как правило, кратность высокотемпературных обжигов может достигать до 4–5 [7].

Ускоряет твердофазовый синтез цемента, состоящего из смеси $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, замена карбоната кальция на CaO , использование

тонкодисперсной сырьевой смеси и высокая степень ее гомогенизации. Согласно патенту [8] для получения гомогенной смеси 30 вес. % двухкальцевого силиката и 70 % вес. % трехкальцевого силиката расчетное количество CaO и SiO_2 предварительно смешивают, а затем измельчают в шаровой мельнице в спиртовом растворе (чтобы не допустить гидратации оксида кальция) в течение 24 часов. Готовую порошкообразную сырьевую смесь сушат при 110°C и обжигают при 1600°C в течение 6 часов.

Как видно, повышение дисперсности и гомогенности исходной сырьевой смеси позволяет снизить температуру и сократить время изотермической выдержки при синтезе силикатов кальция.

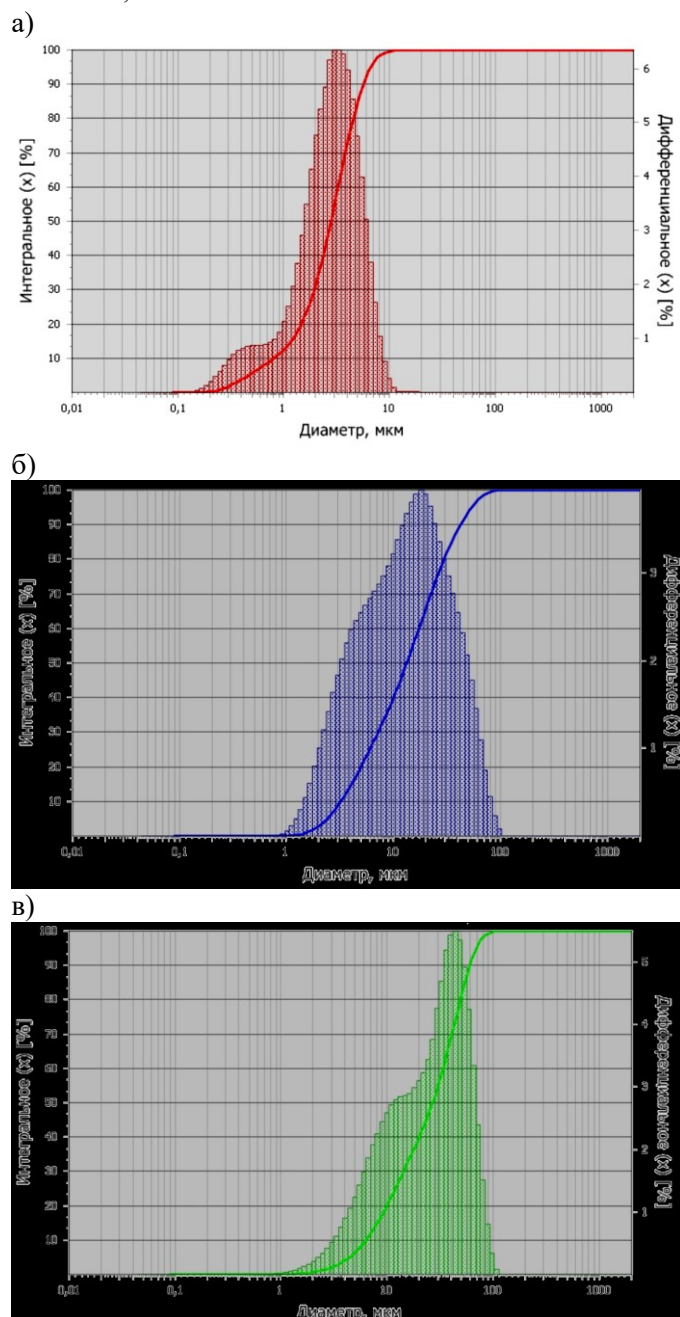
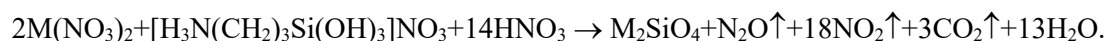


Рис. 2. Гранулометрическая характеристика материалов: а) химически осажденный CaCO_3 ; б) БС-100; в) ПКС-95С

Одним из предельных случаев измельчения и гомогенизации является синтез по золь-гель технологии. Например, применение золь-гель метода для ускорения синтеза минералов силикатов кальция предлагается в патенте [9] с использованием тетраэтилортосиликата и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Нитрат кальция растворяли в 1М растворе азотной кислоты и добавляли к раствору тетраэтилортосиликата при интенсивном перемешивании до получения необходимого состава. После 10–15 мин гидролиза при перемешивании получали гомогенный золь. Предшественник золя запечатывали в контейнере, где ему давали желатинизоваться в течение 1 дня при комнатной температуре и выдерживали в течение еще одного дня при 70 °С. Сушили порошок геля при 600 °С на воздухе в течение 1 часа

при скорости нагревания – 2 °С/мин). Сухой порошок обжигали при 1400 °С в течение 2 часов для проведения полного синтеза.

Интересная возможность получения силикатов кальция рассмотрена в работе [10], где золь-гель синтез совмещен с методом, аналогичным самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу. Как сообщают авторы, гидрогели образуются в результате сушки водных растворов, содержащих нитрат кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 3-аминопропилсилантриол $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OH})_3$ или АПСТОЛ и HNO_3 , которая необходима для стабилизации водного раствора. Затем высушенный гель поджигается. После выгорания органики образуются частично закристаллизованные фазы силикатов кальция (силикат НТ). Как протекает сам процесс горения пока неясно. При горении выделяются CO_2 и NO_2 . Авторы, исходя из состава образующихся продуктов горения, предложили следующую суммарную реакцию:



Образование оксидов азота в рассматриваемом способе должно сильно затруднять его практическое внедрение, так как при его практической реализации необходимо предусмотреть хорошую вентиляцию помещения и очистку газов. Полный синтез соединений протекает при дополнительном обжиге при температуре более 1200 °С (силикат ВТ). Блок-схема технологии представлена на рис.2. Таким способом можно получать силикаты не только кальциевые, но и Mg, Zn, Cd и др. металлы.

Вследствие указанной сложности и сниженной скорости синтеза стоматологических высокоосновных силикатных цементов их промышленное получение низкопроизводительно и дорого.

Синтез же силикатов в рамках технологии получения строительного портландцемента – многотоннажное энергоемкое и материалоемкое производство, при этом обеспечивающее колоссальные объемы недорогой продукции. В связи с чем цементной отраслью накоплен обширный опыт энерго- и ресурсосбережения при синтезе силикатных вяжущих.

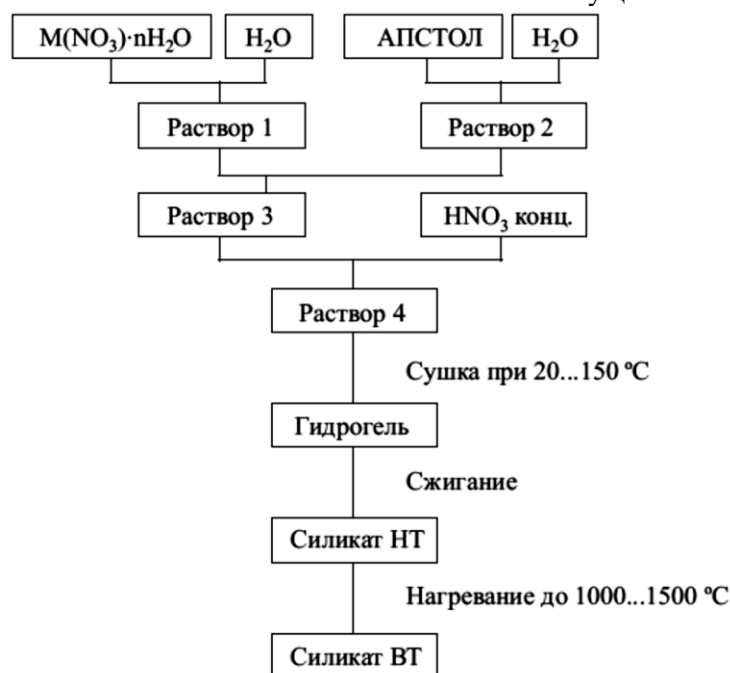
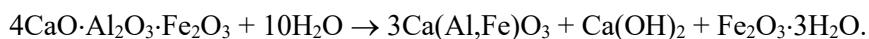
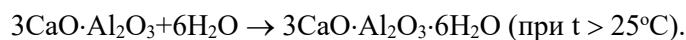
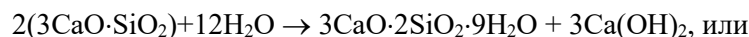


Рис. 3. Блок-схема синтеза силикатов кальция [10].

Примечание: М- ионы Ca, Mg, Zn и др.

Еще в начале XX века, на раннем этапе развития химической технологии портландцемента как отдельной области науки для исследования кристаллохимических характеристик и других физико-химических свойств монокристаллов трехкальциевого силиката его лабораторный высокотемпературный твердофазовый синтез также осуществлялся многократным обжигом в электрической печи смесей карбоната кальция и оксида кремния при 1500 °С. При этом в получаемых небольших количествах химически чистого $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ возможно было обнаружить непрореагировавший оксид кальция.

У Н.А. Торопова в «Химии цемента» (1956 г) описан первый метод получения трехкальциевого силиката, который применял А. Ле-Шателье, через промежуточное образование хлоросиликата кальция $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CaCl}_2$ в ходе низкотемпературной реакции извести и кремнезема в растворе CaCl_2 . Для удаления хлорид-иона хлоросиликат обрабатывался абсолютным алкоголем и водяным паром при 600 °С. Остаточное количество CaCl_2 составило 1,2%.



Рассматривая клинкерные минералы в качестве стоматологических материалов, следует отметить, что при гидратации $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ выделяется гидроксид кальция, который создает высокий pH среды [14]. За счет этого такие цементы обладают антисептическим действием. Продукты гидратации имеют низкую теплопроводность и КТР.

Чистые клинкерные фазы $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ имеют белый цвет в порошке. Все продукты их гидратации также обладают белым цветом [14, 15, 17]. Поэтому не повлияют на окраску зуба. Исключением является $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Он черного цвета и при гидратации образует гель гидроксида железа (III).

Содержание FeO до 0,5 % в клинкере, придающего различные оттенки цементу, ограничивается при производстве белого портландцемента по ГОСТ 965-89 «Портландцементы белые. Технические условия». Поэтому можно считать, что содержание $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ в нем незначительно. Но если данный состав белого цемента применять как зубной, даже малое образо-

Можно заключить, что лабораторный твердофазовый синтез трехкальциевого силиката кальция из двухкомпонентных смесей всегда представлял собой большую трудность, учитывая его нестабильность при низких температурах и склонность к распаду в твердой фазе. Однако в многокомпонентных промышленных цементных сырьевых смесях получение стабильных форм высокоосновных силикатов кальция происходит с высокой скоростью при сниженных температурах в результате образования эвтектических расплавов и твердых растворов, а также минерализующего воздействия примесных соединений.

Как известно, рядовой серый портландцемент представляет собой тонкоизмельченный порошок клинкера и гипса (двуводного сульфата кальция). Получаемый обжигом при 1450 °С клинкер состоит из четырех основных минералов: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S), $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) и $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) [11-13]. В присутствии воды эти минералы гидратируют с образованием гидроалюминатов и гидросиликатов кальция, которые формируют прочный цементный камень:

вание геля гидроксида железа (III) при гидратации алюмоферрита кальция приведет к изменению цвета зуба.

Примечательно, что собственно для синтеза высокоосновных силикатов кальция оксид железа можно рассматривать как минерализатор (катализатор), снижающий температуру появления клинкерного расплава с ≈ 1406 (белый цемент) до 1338 °С (серый цемент) и вязкость клинкерного расплава. В связи с ограничением содержания оксида железа в сырьевой смеси для получения белого портландцементного клинкера необходима температура обжига во вращающейся печи 1500–1600 °С против 1450 °С для серого клинкера.

Также трудностью гипотетического использования промышленного белого цемента являются нормированные ГОСТ 965-89 сроки схватывания, обусловленные наличием трехкальциевого алюмината и достигающие более 1,5–2 часов, что делает пломбировку канала для пациента продолжительной по времени.

В связи с вышеизложенным существующая технология производства белого портландце-

мента может быть взята за основу и интерпретирована при рассмотрении возможности получения клинкера различного минералогического состава в небольших масштабах производства стоматологических цемента. Так, твердофазовый синтез стоматологического цемента, состоящего только из $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, в котором исключен трехкальциевый алюминат, а следовательно, и расплав, можно ускорить, используя минерализаторы (катализаторы), широко применяемые в производстве портландцемента.

В качестве минерализаторов могут быть использованы различные соединения р- и d-элементов [13]. Их применение в производстве белых клинкеров сдерживает тот факт, что многие из них способны окрашивать цемент, снижать его белизну. Наиболее эффективными минерализаторами в цементной промышленности являются фторсодержащие соединения в малых концентрациях: CaF_2 , NaF и т.д., не снижающие в значительной мере белизну. При получении зубных цемента применение фторидов может быть предпочтительным вследствие противокариозного действия фтора.

Для подтверждения интенсифицирующего действия минерализатора CaF_2 на образование высокоосновных силикатов в твердой фазе были приготовлены сырьевые смеси №1 и №2 без минерализатора и без дополнительного измельчения сырьевых компонентов, так как достаточно высокой дисперсностью обладает карбонатный компонент (табл. 1–2, рис.1). Исключение стадии предварительного измельчения позволяет снизить себестоимость продукта. Однократный обжиг смесей при 1500°C с изотермической выдержкой 60 минут (табл. 3) не позволил достичь необходимой полноты синтеза, характеризующейся содержанием $\text{CaO}_{\text{св}} < 1\%$. Остается достаточно большое количество свободного оксида кальция, который при гидратации может привести к неконтролируемому расширению затвердевшего вяжущего и возможному раскалыванию зуба.

Таблица 3

Содержание свободного оксида кальция в продуктах обжига смесей №1,2 при 1500°C , %

№ смеси	Свободный оксид кальция, %
1	12,7
2	8,9

Применение же минерализатора CaF_2 в количестве 0,7 % в пересчете на прокаленное вещество позволяет провести синтез достаточно полно при однократном обжиге: содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ снизилось в 2,6–4,9 раза (табл. 4). Конечно, содержание свободного оксида кальция остается

несколько повышенным, но отрицательный эффект неконтролируемого расширения полученного вяжущего может быть нивелирован высокой тонкостью последующего помола.

Таблица 4

Влияние добавки минерализатора 0,7 % CaF_2 на полноту синтеза сырьевых смесей при 1500°C , %

№ смеси	Свободный оксид кальция, %
1	2,6
2	3,4

В БГТУ им. В.Г. Шухова разработан метод синтеза белого цемента с особым способом ввода минерализатора [16, 17], когда он вводится в ту температурную область, где его интенсифицирующее действие максимально. Примечательно, что при данном способе температура синтеза белого клинкера снижена до интервала $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$, характерного для рядового высокожелезистого портландцементного клинкера со значительным количеством расплава. Учитывая схожесть минералогических составов зубных цемента МТА и белого портландцемента, данный метод также может быть рекомендован для ускорения твердофазового синтеза силикатных зубных составов МТА и снижения его температуры до $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$. Снижение температуры обжига и времени выдержки позволит снизить затраты энергии на обжиг, увеличить срок службы печного агрегата, использовать более дешевые нагревательные элементы печи. В сравнении с золь-гель технологией исключается использование более дорогостоящих исходных сырьевых компонентов, и сокращается общее время, затрачиваемое на синтез цемента.

Таким образом, получение высокоосновных силикатов кальция, составляющих как стоматологические, так и строительные цементы, связано с необходимостью обеспечить их обжиг при высоких температурах – $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$. Минимальная температура синтеза достигается с использованием золь-гель технологии, применяемой при получении стоматологических составов. Снизить температуру образования силикатов кальция в перспективе, вероятно, возможно до $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$ применив особый способ введения минерализаторов, предложенный в БГТУ им. В.Г. Шухова для синтеза белого портландцемента.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» (проект № 075-15-2023-618/СГ-4 «Разработка технологии получе-

ния импортозамещающих силикатных наполнителей для производства стоматологических материалов в ветеринарии»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зулумян А.Н. Материаловедение [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://ysmubooks.am/uploads/Материаловедение.pdf> (дата обращения: 20.11.2023)
2. Боровский Е.В. Проблемы эндодонтического лечения // Клиническая стоматология. 1997. №1. С. 5–8.
3. Павленко А. В., Волосовец Н.Т. Оптимизация подходов к пломбированию корневых каналов силерами // Материалы в стоматологии. 2004. № 1. С. 115–116.
4. Хабазе З.С., Зорян А.В., Магай В.Е., Илюшина А.И., Магомедов О.И., Какабадзе Н.М., Абазян М.Д. Biodentine™ или МТА ProRoot™: сравнительный анализ применения в эндодонтической практике // Эндодонтия Today. 2019. Vol. 17(3). Pp. 47–54. DOI: 10.36377/1683-2981-2019-17-3-47-54
5. Li Q., Coleman N.J. The hydration chemistry of ProRoot MTA // Dental Materials Journal. 2015. № 34(4). Pp. 458–465. DOI:10.4012/dmj.2014-309
6. Antón N., Gamboa R., Amigo V., Torralba J.M. Liquid phase sintering of CMC's based on clinker Portland // J. of European Ceram Society. 2001. Vol. 20 (12). Pp. 2215–2224.
7. Синтез трехкальциевого силиката / [Электронный ресурс] // SitLay: [сайт]. URL: <https://sitlay.ru/tehnologiya-stroitelstva/sintez-trekhkalciovogo-silikata/> (дата обращения: 20.11.2023).
8. Yang Q., Lu D. Premixed biological hydraulic cement paste composition and using the same. Patent US. No US8475811B2, 2008.
9. Lu D., Zhou S. High strength biological cement composition and using the same Patent US. No US7553362B2, 2007.
10. Малявский Н.И., Зверева В.В. Новый метод золь-гель синтеза ортосиликатов // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 140–146.
11. Ерыгина А.О., Мишин Д.А., Классен В.К. Последовательность взаимодействий Na₂O с клинкерными минералами при их различных сочетаниях // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 12. С. 98–104. DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543
12. Мирошникова Ю.В., Мирошникова О.В., Классен В.К. Влияние введенных в сырьевой шлам углеотходов на качество цементного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №11. С. 159–163.
13. Осокин, А.П., Кривобородов Ю.Р., Потапова Е.Н. Модифицированный портландцемент Московский хим.-технол. ин-т им. Д. И. Менделеева. М.: Стройиздат, 1993. 321 с.
14. Лугинина, И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов: учебное пособие. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004 (Отпеч. в ун-те). 20 с.
15. Кузьменков М.И., Сушкевич М.И., Манак Т.Н. Синтез клинкера для стоматологического цемента для пломбирования корневых каналов // Труды БГТУ № 3. Химия и технология неорганических веществ. 2011. С. 79–83.
16. Мишин Д.А., Ковалев С.В., Чекулаев В.Г. Причина снижения эффективности действия минерализаторов обжига портландцементного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №5. С.161–166.
17. Мишин Д.А., Ковалев С.В. Температура ввода минерализатора как фактор получения белого клинкера с повышенным содержанием оксида железа // Цемент и его применение. 2022. № 1. С. 99–101.

Информация об авторах

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич кандидат технических наук, доцент кафедры технологии технологии стекла и керамики. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Таралло Захар Владиславович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: tarallo.1998@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Евтушенко Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор. E-mail: eveviv@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лукин Евгений Степанович доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии керамики и огнеупоров. E-mail: lukin.e.s@muctr.ru. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева.

Поступила 27.11.2023 г.

© Мишин Д.А., Дороганов В.А., Долгова Е.П., Таралло З.В., Евтушенко Е.И., Лукин Е.С. 2023

^{1,*}Mishin D.A., ¹Doroganov V.A., ¹Dolgova E.P., ¹Tarallo Z.V., ¹Evtushenko E.I., ²Lukin E.S.

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

²D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

*E-mail: mishinda.xtasm@yandex.ru

METHODS OF SYNTHESIS OF SILICATE-CONTAINING CLINKER DENTAL CEMENT

Abstract. The article provides an overview of modern cements used in dentistry with an emphasis on silicate cements such as mineral trioxide aggregate (MTA). The basic requirements for dental cements are given, including their safety, adhesion to tooth tissues, resistance to various influences and thermal properties.

The article analyzes in detail the composition and properties of industrial white Portland cement used in construction, in comparison with the characteristics of dental silicate cements. The general issues of the synthesis of high-base calcium silicates used in dentistry are considered from the standpoint of the chemical technology of Portland cement. The mineralogical composition and hydration processes of various cement components, their effect on tooth color and other properties are discussed.

The methods of reducing the temperature and increasing the rate of formation of calcium silicates, common in the technology of dental cements and in the production of Portland cement, are indicated. It is assumed that it is possible to accelerate solid-phase synthesis in the range of 1250–1350 °C with a special method of introducing mineralizers proposed at the V.G. Shukhov BSTU for the synthesis of white Portland cement, provided it is adapted for dental formulations.

Keywords: dental cements, clinker minerals, mineralizers, silicate synthesis, dentistry.

REFERENCES

1. Zulumyan A.N. Materials Science [Materialovedenie]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://ysmubooks.am/uploads.pdf> (date of treatment: 20.11.2023)
2. Borovsky E.V. Problems of endodontic treatment [Problemy endodonticheskogo lecheniya]. Clinical dentistry. 1997. No. 1. Pp. 5–8. (rus)
3. Pavlenko A.V., Volosovets N.T. Optimization of approaches to filling root canals with silers [Optimizaciya podhodov k plombirovaniyu kornevnyh kanalov silerami]. Materialy v stomatologii. 2004. No. 1. Pp. 115–116. (rus)
4. Khabadze Z.S., Zoryan A.V., Magai V.E., Il'yushina A.I., Magomedov O.I., Kakabadze N.M., Abazyan M.D. Biodentine™ or MTA ProRoot™: a comparative analysis of application in endodontic practice [Biodentine™ ili MTA ProRoot™: sravnitel'nyj analiz primeneniya v endodonticheskoy praktike]. Endodontia Today. 2019. 17(3). 47–54. DOI: /10.36377/1683-2981-2019-17-3-47-54 (rus)
5. Qiu Li, Nichola J. Coleman. The hydration chemistry of ProRoot MTA. Dental Materials Journal. 2015. No 34(4). Pp. 458–465. DOI:10.4012/dmj.2014-309
6. Antón N., Gamboa R., Amigo V., Torralba J.M. Liquid phase sintering of CMC's based on clinker Portland. J. of European Ceram Society. 2001. Vol. 20 (12). Pp. 2215–2224.
7. Synthesis of tricalcium silicate [Sintez trekhkal'cievogo silikata]. SitLay: URL: <https://sitlay.ru/tehnologiya-stroitelstva/sintez-trekhkalciyevogo-silikata>. (date of treatment: 11.20.2023). (rus)
8. Yang Q., Lu D. Premixed biological hydraulic cement paste composition and using the same. Patent US. No US8475811B2, 2008.
9. Lu D., Zhou S. High strength biological cement composition and using the same Patent US. No US7553362B2, 2007.
10. Malyavsky N.I., Zvereva V.V. A new method of sol-gel synthesis of orthosilicates [Novyj metod zol'-gel' sinteza ortosilikatov]. Vestnik MGSU. 2013. No. 10. Pp. 140–146 (rus)
11. Yerygina A.O., Mishin D.A., Klassen V.K. Sequence of interactions of Na₂O with clinker minerals in their various combinations [Posledovatel'nost' vzaimodejstvij Na₂O s klinkernymi mineralami pri ih razlichnyh sochetaniyah]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2018.

No. 12. Pp. 98–104. DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543 (rus)

12. Miroshnikova Yu.V., Miroshnikova O.V., Klassen V.K. The influence of carbon waste introduced into raw sludge on the quality of cement clinker [Vliyanie vvedennykh v syr'evoy shlam ugleotodov na kachestvo cementnogo klinkera]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No.11. Pp. 159–163. (rus)

13. Osokin A.P., Krivoborodov Yu.R., Potapova E.N. Modified Portland cement [Modificirovannyj portlandcement]. D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Stroyizdat, 1993. 321 p. (rus)

14. Luginina I.G. Chemistry and chemical technology of inorganic binders: a textbook [Himiya i himicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh vyazhushchih materialov: uchebnoe posobie]. Belgorod: BSTU, 2004. 20 p. (rus)

15. Kuzmenkov M.I., Sushkevich M.I., Manak T.N. Synthesis of clinker for dental cement for root canal filling [Sintez klinkera dlya stomatologicheskogo cementa dlya plombirovaniya kornevyh kanalov]. Trudy BGTU No 3. Himiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv. 2011. Pp. 79–83. (rus)

16. Mishin D.A., Kovalev S.V., Chekulaev V.G. The reason for the decrease in the effectiveness of Portland cement clinker roasting mineralizers [Prichina snizheniya effektivnosti dejstviya mineralizatorov obzhiga portlandcementnogo klinkera]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 5. Pp.161–166. (rus)

17. Mishin D.A., Kovalev S.V. Mineralizer input temperature as a factor in obtaining white clinker with a high content of iron oxide [Temperatura vvoda mineralizatora kak faktor polucheniya belogo klinkera s povyshennym sodержанием oksida zheleza] Cement i ego primenenie. 2022. No. 1. Pp. 99–101. (rus)

Information about the authors

Mishin, Dmitry A. PhD, Associate professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: mishinda.xtms@yandex.ru . Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Doroganov, Vladimir A. PhD, Associate professor of the Department of technologies of glass and ceramics. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Dolgova, Elena P. PhD, Associate professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: elenapavlovnaer@yandex.ru . Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Tarallo, Zakhar V. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: tarallo.1998@mail.ru . Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Evtushenko, Evgeny I. DSc, Professor. E-mail: eveviv@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Lukin, Evgeny S. DSc, Professor of the Departments of Chemical technology of ceramics and refractories. E-mail: lukin.e.s@muctr.ru. D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology. D.I. Mendeleev Russian

Received 27.11.2023

Для цитирования:

Мишин Д.А., Дороганов В.А., Долгова Е.П., Таралло З.В., Евтушенко Е.И., Лукин Е.С. Способы синтеза силикатсодержащего клинкера стоматологического цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-97-105

For citation:

Mishin D.A., Doroganov V.A., Dolgova E.P., Tarallo Z.V., Evtushenko E.I., Lukin E.S. Methods of synthesis of silicate-containing clinker dental cement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-97-105

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-106-114

Савичев А.О., Шарапов Р.Р., *Азарков А.М.*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет***E-mail: AgarkovAM@mgsu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЕНИВАНИЯ БИТУМА В СМЕСИТЕЛЕ

Аннотация. В статье рассмотрены основные способы экономии материальных, трудовых, финансовых ресурсов при производстве асфальтобетонных смесей. Показано, что перспективным способом экономии энергии и снижения вредного воздействия на окружающую природную среду является снижение температуры битума. Предложена конструкция пеногенератора, позволяющая эффективно перемешивать битум с образовавшимся паром. Для описания реологии в статье используется модель степенной жидкости Оствальда де Вейля. Получено выражение для функции тока, дает возможность найти характеристики течения несущей фазы в смесителе, учитывающие геометрические параметры смесителя, такие как диаметр и длина трубы, радиус шнека, параметры потока на входе в смеситель. Показано, что при одних и тех же условиях течения для получения одинакового расхода в случае псевдопластической жидкости необходимо приложить больший градиент давления по сравнению с Ньютонской жидкостью. На разработанной лабораторной установке проведены экспериментальные исследования, которые позволяют определить рациональную конструкцию и технические параметры установки вспененного битума, параметры которой в процессе эксперимента изменялись. Получено уравнение регрессии в кодированном виде, выражающее зависимость качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в зависимости от конструктивно-технологических параметров разработанного устройства вспенивания битума.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, вспененный битум, пеногенератор, смеситель, качество сцепления.

Введение. На современном этапе дорожного строительства значительную практическую ценность представляют технологии производства асфальтобетонных смесей при температурах, вызывающих значительную экономию материальных, трудовых, финансовых ресурсов. При этом также желательно обеспечить минимальное отрицательное воздействие на человека и окружающую среду. Основной задачей при производстве асфальтобетонных смесей в дорожном строительстве является обеспечение надежности и качества готового продукта с использованием относительно недорогих ресурсов, минимальных затратах и высокой эффективности производства.

Основным вяжущим материалом при производстве асфальтобетонных смесей в дорожном строительстве является битум. Одним из перспективных направлений экономии битума является применение технологии производства теплых асфальтобетонных смесей. Введение битума с пониженной температурой в процесс смешивания асфальтобетонной смеси позволит понизить температуру асфальта и повысить сцепление с поверхностью щебня. Это позволяет существенно снизить расход энергии и уменьшить вредное влияние на окружающую природную среду.

В настоящее время, когда Российскую Федерацию накрывают волны санкций недружественных государств, в целях импортозамещения идет

активное развитие отечественных технологий и оборудования. При этом необходимо совершенствовать технологию производства теплых асфальтобетонных смесей за счет разработки оборудования для вспенивания битума на российских комплектующих.

Снижение эксплуатационных и энергетических расходов на приготовление асфальтобетонных смесей и снижение нагрузки на экологию в ряду прочих является одной из важнейших задач при дорожном строительстве. Эти факторы вынуждают исследователей искать новые пути решения данных проблем. Их решение возможно за счет совершенствования процесса приготовления асфальтобетонной смеси путем, в частности, механического перемешивания горячего битума с водой в статическом смесителе, что позволит снизить температуру процесса. В связи с чем, весьма актуальной научной проблемой является разработка такого смесителя, обеспечивающего получение качественной смеси.

Основная задача при производстве асфальтобетонных смесей (АБС) – обеспечение надежности и качества готового продукта с использованием недорогих ресурсов, минимальных затратах и высокой эффективности производства [1–4].

Наибольшую практическую ценность представляют технологии производства АБС при тем-

пературах, вызывающих значительную экономию материальных, трудовых, финансовых ресурсов с минимальным отрицательным воздействием на окружающую среду, человека и позволяющую получить высокое качество готового продукта [5, 6].

Материалы и методы. В настоящее время укладка горячей асфальтобетонной смеси ведется при температуре не ниже 120 °С.

Несоблюдение температурного режима может привести к температурной сегрегации АБС и впоследствии к недостаточному её уплотнению.

Однако существуют способы уменьшить расход энергии, снизить уровень выброса летучих органических соединений при подготовке АБС, не повлияв на качество ее уплотнения [7].

Сегодня более 50 % энергии, необходимой для производства АБС, расходуется на нагрев и сушку каменных материалов, поддержание требуемой температуры битума. Снижение температуры исходных материалов для производства АБС позволяет получить значительную экономию энергоносителей и существенно сократить выбросы CO₂ (рис. 1).

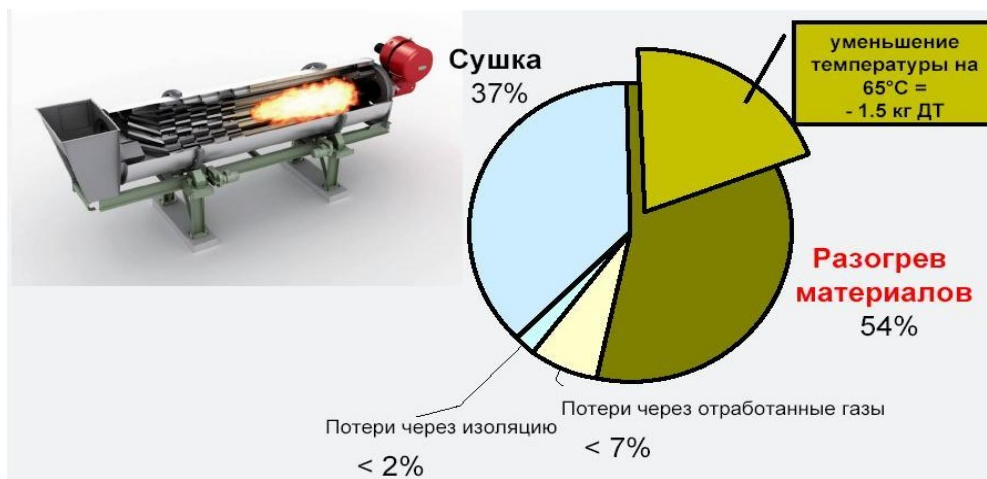


Рис. 1. Круговая диаграмма экономии энергоносителей при снижении температуры разогрева минеральных материалов

Ежегодно в мире производятся сотни миллионов тонн тёплой асфальтобетонной смеси. Вспенивание битума водой лежит в основе 60 % всех объемов производства тёплой асфальтобетонной смеси [8–12]. В основу существующего оборудования вспенивания битума непосредственно в асфальтосмесительных установках (АСМУ) ведущих мировых производителей лежит способ подачи в пеногенератор, в поток с дозой горячего битума расчетного количества воды под давлением [13]. При этом вода мгновенно доводится до точки кипения и частично испаряется, в результате чего образуется смесь из водяного пара и битума. Полученная смесь подается в мешалку АСМУ. Мелкие паровые пузырьки, которые исчезают при уплотнении смеси, создают значительную подвижность смеси при её перевозке на большие расстояния.

Вспененный битум образуется при смешивании 2...3 % воды с битумом, нагретым примерно до 180 °С (рис. 2). Вода мгновенно доводится до точки кипения, испаряется и битум охватывает пузырьки водяного пара. Во время вспенивания битум теряет примерно 2 °С на процент распыляемой воды. Полученная смесь подается в смеситель. Образуется пена – то есть вспененный битум. Благодаря вспениванию, вязкость битума будет снижена настолько, что поверхности заполнителя (щебень, песок и минеральный порошок) будут равномерно обволакиваться битумной пленкой заданной толщины, также и при низких температурах. Таким способом можно производить низкотемпературный асфальт, без ухудшения физико-механических свойств теплой асфальтобетонной смеси.

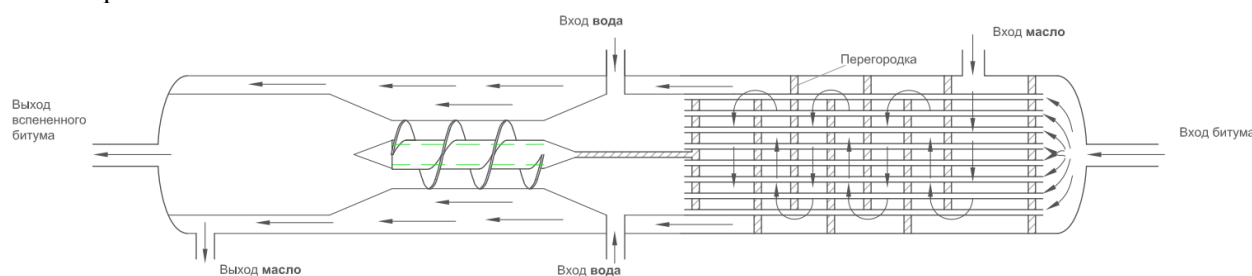


Рис. 2. Конструктивная схема узла вспенивания битума

Установки вспененного битума позволяют производить вспененный битум с различным процентным соотношением битумно-водяной смеси, в зависимости от особенностей асфальтовых материалов и объемов партии согласно рецептуре, и процесс контролируется автоматически. Система управления и контроля за всеми параметрами производственного процесса позволяет оператору быстро реагировать на изменяющиеся условия работы. В случае внештатной ситуации работа всех узлов установки блокируется. Возможна работа в ручном и полуавтоматическом режиме, когда система автоматически отслеживает соотношение битума, воды и различных добавок, позволяя получать асфальтобетоны с регулируемыми свойствами.

Основная часть. В работе предлагается исследовать изменение площади поперечного сечения потока трубопровода битума в зоне смешивания с водой, а также исследовать влияние установки специального винтового элемента для образования завихрения и эффективного перемешивания битума с водой. Такие конструктивные изменения оказывают влияние на работу смесительной установки в целом. Для исследования

$$\psi(r, z) = \frac{1}{2} U r^2 + r \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\sin\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \left(C_n J_1(Kr) + D_n Y_1(Kr) \right) - \frac{5}{3} \frac{\Omega^2}{k^4} G_{3,1}(kr) \right] \right). \quad (2)$$

Частицы жидкости движутся вдоль линии тока по поверхности, образованной вращением кривой относительно оси симметрии течения. Выражение для функции тока (2) дает возможность найти характеристики течения несущей фазы в смесителе. При этом учитываются геометрические параметры смесителя, такие как диаметр и длина трубы, радиус шнека, параметры потока на входе в смеситель.

Для решения задач транспортировки битума при нестационарной работе перекачивающих насосов требуется эффективный инструментальный для расчета интегральных характеристик при течении битумного вяжущего по трубам.

Будем рассматривать нестационарное движение вязкой несжимаемой жидкости по трубе, сечение которой меняется с расстоянием и временем. Это даст нам возможность применить рассуждения к рассмотрению активного транспорта битума в деформируемых трубах.

Связь между перепадом давления δp_L при $z = L$ и расходом Q :

$$\delta p_L = \frac{(3n+1)}{n} \frac{1}{Re} \frac{L}{\pi R^4} Q. \quad (3)$$

На рисунке 3 представлено влияние на параметр δp_L различных значений параметров течения n , полученных по выражению (3). В данном выражении отмечено, что при $n = 1$ уравнение

этого влияния, а также для разработки алгоритма управления такой установкой нами разработана математическая модель процесса перемещения битума в предложенном смесителе.

В рассматриваемом процессе жидкое битумное вяжущее является гетерогенной (многофазной) смесью, в частности – жидкостью с пузырьками газа. Это дисперсная среда, состоящая из двух фаз: несущая фаза – битум, дисперсная фаза – взвешенные пузырьки пара, образованные из вводимой воды.

В реологическом смысле битум является псевдопластической жидкостью, для описания которой используется модель степенной жидкости Оствальда де Вейля (1):

$$\sigma = \gamma(\varepsilon)^n, \quad (1)$$

при $n < 1$. Уравнение (1) является эмпирическим, имеющим два параметра: константу γ , зависящую от природы материала и геометрических размеров измерительной аппаратуры, и константу n , являющуюся индексом течения [14].

(3) совпадает с формулой, описывающей течение Пуазейля по трубе кругового сечения [15] (рис. 3).

Анализ графических зависимостей показывает, что при одних и тех же условиях течения для получения одинакового расхода в случае псевдопластической жидкости нужно приложить больший градиент давления по сравнению с Ньютонской жидкостью.

Экспериментальные исследования позволяют определить рациональную конструкцию и технические параметры установки вспененного битума, параметры которой в процессе эксперимента можно изменять. Это позволяет определить такой технологический режим ее работы, который позволит достичь максимального качества сцепления битумного вяжущего с поверхностью инертного материала при однородном взаимодействии жидких сред с различными физико-химическими свойствами (битум – вода).

Уравнение регрессии, выражающее зависимость качества сцепления ε вспененного битума с инертным материалом устройства вспененного битума от процента подачи воды V , % (X_1), давления подачи воды $p(X_2)$ в рабочую зону, количество трубок $n(X_3)$ и длины трубок $L(X_4)$ устройства вспененного битума в кодированном виде имеет вид:

$$\varepsilon = 53 - 13,4X_1 - 3,1X_1^2 + 11,5X_2 + 1,8X_2^2 + 3,1X_3 + 1,1X_3^2 + 2,1X_4 + 2,4X_4^2 + 1,3X_1X_2 + 2,4X_1X_3 + 1,2X_3X_4. \quad (4)$$

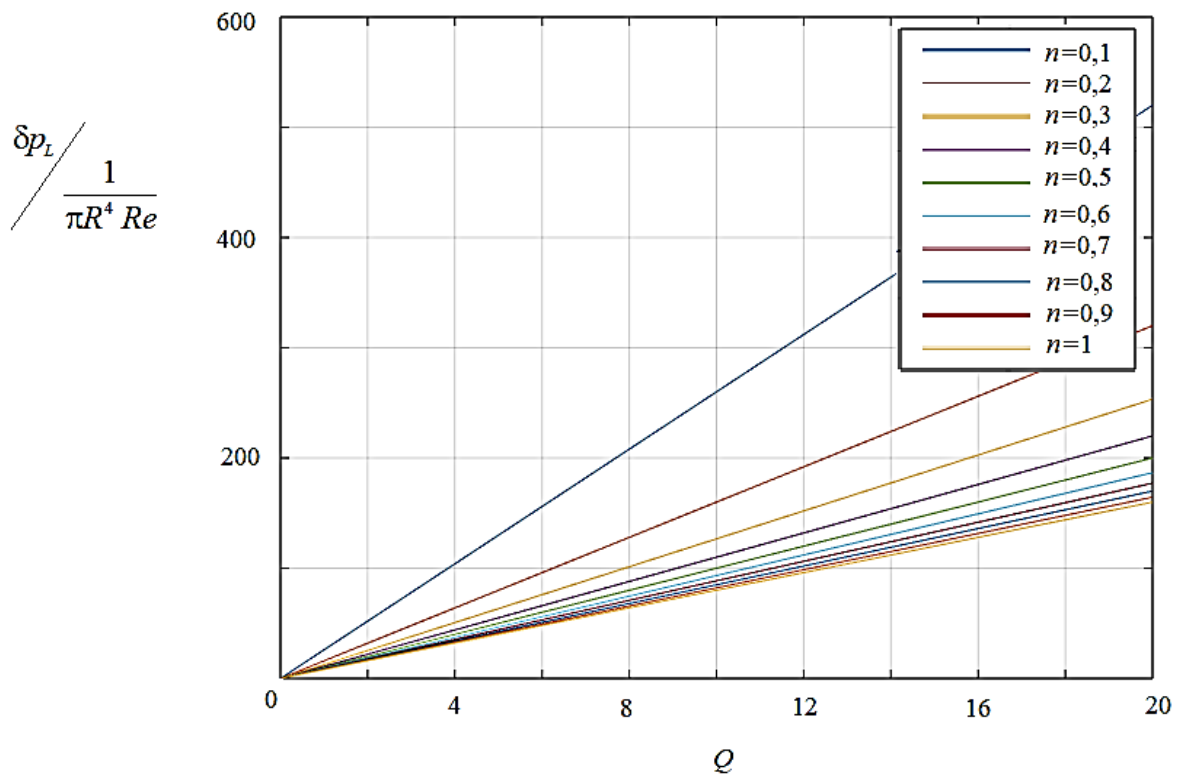


Рис. 3. Влияние на параметр δp_L различных значений параметров течения n

На рисунке 4 представлена зависимость влияния объема V подачи воды на качество сцепления вспененного битума с инертным материалом ε при различных значениях количества n трубок, постоянном давлении подачи воды $p = 22$ Бар и длине трубок $L=200$ мм.

Здесь видно, что все представленные зависимости имеют убывающий характер, то есть с увеличением количества подачи воды при различных значениях количества n трубок уменьшается качество сцепления вспененного битума с инертным материалом ε .

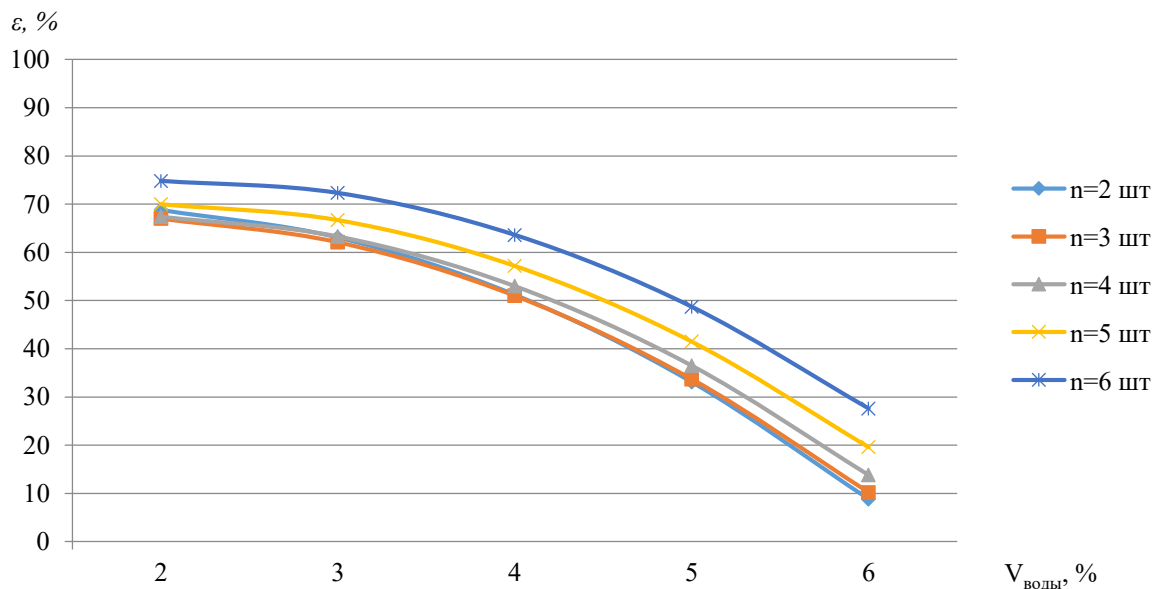


Рис. 4. Зависимость качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε от объема V подачи воды при различных значениях количества n трубок, постоянном давлении подачи воды $p = 22$ Бар и длине трубок $L = 200$ мм

Например, при максимальном значении объема V подачи воды $V = 6$ % (рис. 4, линия $n = 6$

шт.) параметр ε составляет 27,6 %. Дальнейшее уменьшение объема V подачи воды до значений

$V = 5\%$ и $V = 4\%$ приводит к увеличению значений качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет соответственно 48,7 и 63,6 %. При уменьшении объема V подачи воды до значения равного 3 %, качество сцепления вспененного битума с инертным материалом ε составит 72,3 %. Максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом установки вспенивания битума ε достигается при объеме V подачи воды $V = 2\%$ и составляет 74,8 %. Изменение объема V подачи воды позволяет варьировать значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в пределах 27,6–74,8 %.

Дальнейшее уменьшение V подачи воды увеличивает параметр ε о чем говорят кривые, характеризующие качество сцепления вспененного битума с инертным материалом. Например, при максимальном значении объема V подачи воды $V = 6\%$ (рис. 4, линия $n=3$ шт.) параметр ε составляет 10,2 %. При дальнейшем уменьшении объема V подачи воды до значений $V = 5\%$ и $V = 4\%$ наблюдается увеличение значений качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε , которое составляет соответственно 33,7 и 51 %. При уменьшении объема V подачи воды до значений $V = 3\%$ качество сцепления вспененного битума с инертным материалом увеличивается и составляет 62,1 %. Максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε достигается при объеме V подачи воды равного $V = 2\%$, и составляет 67 %. Изменение объема V подачи воды позволяет варьировать значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в пределах 10,2–67 %.

Анализируя зависимость при количестве трубок $n = 4$ шт. (рис. 4), приходим к выводу, что при максимальном значении объема V подачи воды $V = 6\%$ параметр ε составляет 13,8 %. С уменьшением объема V подачи воды до значений 5 % и 4 % качество сцепления вспененного битума с инертным материалом возрастает и составляет 36,5 и 53 %. Дальнейшее уменьшение объема V подачи воды до значений $V = 3\%$ приводит к увеличению значения качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет 63,3 %. Максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом достигается при объеме V подачи воды $V = 2\%$ и составляет 67,4 %. Изменение объема V подачи воды позволяет варьировать значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в пределах 13,8–67,4 %.

Анализируя уравнение регрессии (4) при количестве трубок $n = 5$ шт. (рис. 4), получаем, что

при максимальном значении объема V подачи воды $V = 6\%$ параметр ε составляет 19,6 %. Уменьшение объема V подачи воды до значений равных 5 % и 4 %, приводит к увеличению значений качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет соответственно 41,5 и 57,2 %. Дальнейшее уменьшение объема V подачи воды до значений $V = 3\%$ приводит к увеличению значения качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет 66,7 %. Максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом достигается при объеме V подачи воды $V = 2\%$ и составляет 70 %. Изменение объема V подачи воды позволяет варьировать значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в пределах 19,6–70 %.

Минимальные значения качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε наблюдаются при минимальном количестве трубок $n = 2$ шт. (рис. 4). При максимальном значении объема V подачи воды, равного 6 %, параметр ε составляет 8,8 %. Уменьшение объема V подачи воды до значений 5 % и 4 % приводит к увеличению значений качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет соответственно 33,1 и 51,2 %. Дальнейшее уменьшение объема V подачи воды до значений $V = 3\%$ приводит к увеличению значения качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε и составляет 63,1 %. Максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом достигается при объеме V подачи воды $V = 2\%$ и составляет 68,8 %. Изменение объема V подачи воды позволяет варьировать значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом в пределах 8,8–68,8 %.

При анализе графиков, изображенных на рисунке 4, можно сделать вывод, что максимальное значение качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε достигается при объеме V подачи воды $V = 2\%$, количестве трубок $n = 6$ шт. и составляет $\varepsilon = 74,8\%$.

На рисунке 5 представлена зависимость влияния давления подачи воды на качество сцепления вспененного битума с инертным материалом ε при различных значениях объема V подачи воды, постоянном количестве трубок $n = 4$ шт. и длины трубок $L = 200$ мм.

На рисунке 5 видно, что все представленные зависимости имеют возрастающий характер, то есть с увеличением давления подачи P воды при различных значениях объема V подачи воды, увеличивается качество сцепления вспененного битума с инертным материалом ε .

При анализе графиков, изображенных на рисунке 5, можно сделать вывод, что максимальное значение параметра ε достигается при давлении

подачи воды $P = 40$ Бар, подачи воды $V = 2 \%$ и составляет $\varepsilon = 90,4 \%$.

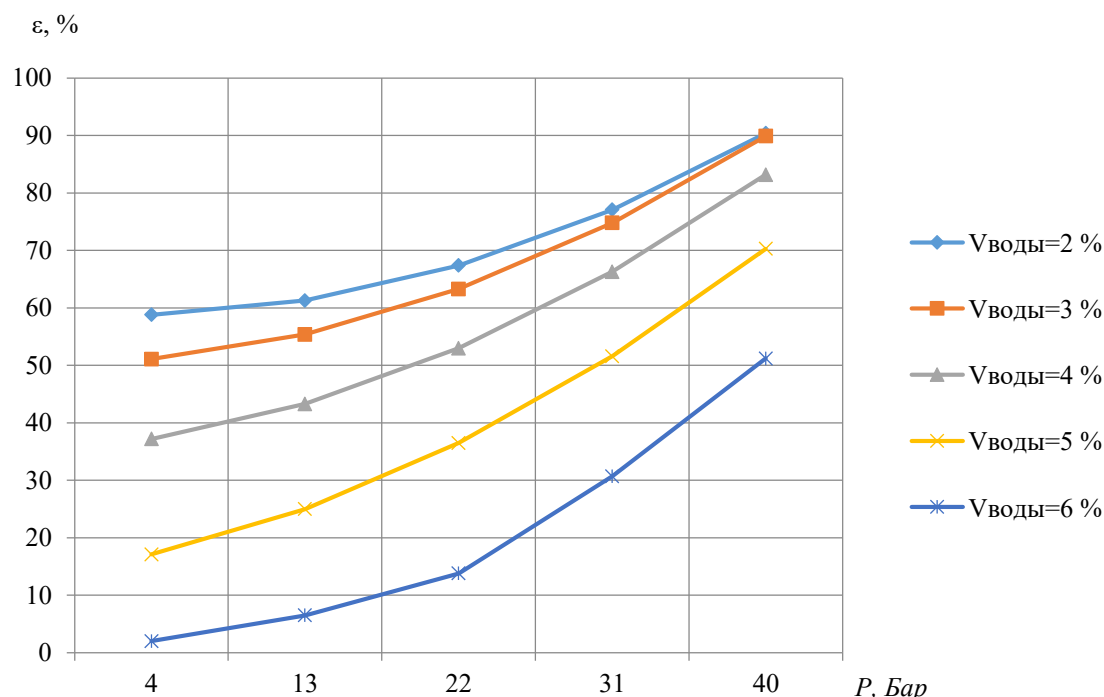


Рис. 5. Зависимость качества сцепления вспененного битума с инертным материалом ε от давления подачи воды при различных значениях объема V подачи воды, постоянном количестве трубок $n = 4$ шт. и длины трубок $L = 200$ мм

Выводы.

1. Рассмотрена новая конструкция смесителя вспененного битума для выпуска тёплого асфальтобетона.

2. С учетом конструктивно-технологических особенностей рассмотренной конструкции смесителя предложена аналитическая связь между перепадом давления в трубе смесителя и расходом битума.

3. При проведении поисковых экспериментов выявлены параметры, влияющие на режим и технологические показатели установки вспенивания битума и уровни варьирования факторов, при которых достигается наилучшее качество сцепления вспененного битума с инертным материалом.

4. Полученное уравнение регрессии позволило осуществить выбор рациональных конструктивных параметров и технологический режим установки вспенивания битума.

5. По результатам экспериментов, выявлено, что максимальное значение параметра качества сцепления вспененного битума с инертным материалом $\varepsilon = 95,8 \%$ достигается при следующих значениях: давление подачи воды $P = 40$ Бар, длины трубок $L = 300$ мм, объём $V = 4 \%$ подачи воды, количество трубок $n = 4$ шт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарапов Р.Р., Бойчук И.П., Савичев А.О. К вопросу расчета стационарного и не стационарного течения битумного вяжущего в технологии производства теплых асфальтобетонных смесей // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 18 С. 80–85.
2. Шарапов Р.Р., Савичев А.О. Установка для технологии производства теплых асфальтобетонных смесей // Журнал «Технологии бетонов». 2022. №3 (182). С. 61–63
3. Лупанов А.П., Силкин В.В. Основные направления совершенствования производства асфальтобетонных смесей // Транспортное строительство. 2022. №1. С. 2–5.
4. Лупанов А.П., Силкин А.В., Гуляев К.М., Силкин В.В. Совершенствование технологии и оборудования для вспенивания битума на АБЗ // Автомобильные дороги. 2021. №7 (1076). С. 145–149.
5. Савичев А.О. Совершенствование технологии производства асфальтобетонной смеси с использованием вспененного битума // Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-иссле-

довательских работ студентов Института инженерно-экологического строительства и механизации НИУ МГСУ. Москва. 2021. С. 193–197.

6. Лупанов А.П., Силкин В.В., Суханов А.С., Гладышев Н.В. Эффективность производства асфальтобетонных смесей на вспененном битуме // Автомобильные дороги. 2017. С. 89–91.

7. Васильев В.В., Ивкин А.С., Саламатова Е.В., Майданова Н.В. Совершенствование методов определения сцепления битума с минеральными материалами // Известия СПбГТИ (ТУ). 2018. № 42 (68). С. 58–61.

8. Абдуллин А.И., Емельянычева Е.А., Дияров И.Н. Оценка адгезии битума к минеральному материалу в асфальтобетоне на основе его смачивающих свойств // Вестник Казанского технологического университета. 2009. Т. 4. С. 256–259.

9. Emelyanycheva E., Abdullin A. The modification of road petroleum bitumen with petrochemical wastes and polymers // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2021. Т. 56. № 6. Pp. 1249–1255.

10. Abdullin A.I., Emelyanycheva E.A. Water-bitumen emulsions based on surfactants of various types // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Т. 55. № 1. Pp. 73–80.

11. Ивкин А. С. Оценка сцепления битума с минеральными материалами // Проблемы недро-

пользования: Сб. науч. тр. международного форума-конкурса молодых ученых. СПб: РИЦ Горного университета. 2016. С. 212–213.

12. Vasil'ev V.V., Ivkin A.S., Salamatova E.V., Kondrasheva N.K., Givirovskiy G.S. The patterns of bitumen distribution onto surfaces of different mineral materials // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018. 11th. 2019. Pp. 353–358.

13. Lupanov A.P., Fotiadi A.A., Silkin V.V., Gnezdilova S.A., Gulyaev K.M. Influence of asphalt granulate on asphalt concrete properties // AIP Conference Proceedings. 2023. Pp. 80–85.

14. Матвиенко О.В., Бауев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. С. 171–192.

15. Perelygin D.N., Boichuk I.P., Grinek A.V., Kozlov V.K. Theoretical study of the flow of cement raw material sludge through pipes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 552(1). 012037. DOI:10.1088/1757-899X/552/1/012037.

Информация об авторах

Савичев Александр Олегович, аспирант кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства. E-mail: alex.savichev@inbox.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Шарапов Рашид Ризаевич, доктор технических наук, профессор кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства. E-mail: ptdm_zavkaf@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Агарков Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства. E-mail: AgarkovAM@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 25.10.2023 г.

© Савичев А.О., Шарапов Р.Р., Агарков А.М., 2023

Savichev A.O., Sharapov R.R., *Agarkov A.M.
National Research Moscow State University of Civil Engineering
**E-mail: AgarkovAM@mgsu.ru*

STUDY OF THE FOAMING PROCESS OF BITUMEN IN THE MIXER

Abstract. The article discusses the main ways to save material, labor and financial resources in the production of asphalt concrete mixtures. It has been shown that a promising way to save energy and reduce harmful effects on the environment is to reduce the temperature of the bitumen. A foam generator design has been proposed that allows efficient mixing of bitumen with the generated steam. To describe rheology, the article uses the Ostwald-de Waele power-law fluid model. An expression for the current function is obtained, which allows to find the characteristics of the flow of the carrier phase in the mixer, taking into account the geometric parameters of the mixer, such as the diameter and length of the pipe, the radius of the screw, and the flow parameters at the inlet to the mixer. It is shown that under the same flow conditions, in order to obtain the same flow rate in the case of a pseudoplastic fluid, it is necessary to apply a greater pressure gradient

compared to a Newtonian fluid. Experimental studies are carried out on the developed laboratory installation, which make it possible to determine the rational design and technical parameters of the foamed bitumen installation, the parameters of which are changed during the experiment. A regression equation is obtained in coded form, expressing the dependence of the quality of adhesion of foamed bitumen to inert material depending on the design and technological parameters of the developed bitumen foaming device.

Keywords: asphalt concrete mixture, foamed bitumen, foam generator, mixer, grip quality.

REFERENCES

1. Sharapov R.R., Boychuk I.P., Savichev A.O. The calculating steady and unsteady the flow of bitumen binder for the production technology of warm asphalt concrete mixtures [K voprosu rascheta stacionarnogo i ne stacionarnogo techeniya bitumnogo vyazhushhego v tekhnologii proizvodstva teply'x asfal'tobetonny'x smesey]. Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023. No. 18. Pp. 80–85. (rus)
2. Sharapov R.R., Savichev A.O. Installation for the production technology of warm asphalt concrete mixtures [Ustanovka dlya tekhnologii proizvodstva teply'x asfal'tobetonny'x smesey]. Journal of Concrete Technologies. 2022. No. 3 (182). Pp. 61–63. (rus)
3. Lupanov A.P., Silkin V.V. Main directions for improving the production of asphalt concrete mixtures [Osnovny'e napravleniya sovershenstvovaniya proizvodstva asfal'tobetonny'x smesey]. Transport construction. 2022. No. 1. Pp. 2–5. (rus)
4. Lupanov A.P., Silkin A.V., Gulyaev K.M., Silkin V.V. Improving technology and equipment for foaming bitumen at asphalt plants [Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya dlya vspenivaniya bituma na ABZ]. Automobile roads. 2021. No. 7 (1076). Pp. 145–149. (rus)
5. Savichev A.O. Improving the technology for producing asphalt concrete mixtures using foamed bitumen [Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi s ispol'zovaniem vspennogo bituma]. Days of Student Science. Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Engineering and Environmental Construction and Mechanization of the National Research University MGSU. Moscow, 2021. Pp. 193–197. (rus)
6. Lupanov A.P., Silkin V.V., Sukhanov A.S., Gladyshev N.V. Efficiency of production of asphalt concrete mixtures using foamed bitumen [E'ffektivnost' proizvodstva asfal'tobetonny'x smesey na vspennom bitume]. Automobile roads. 2017. Pp. 89–91. (rus)
7. Vasiliev V.V., Ivkin A.S., Salamatova E.V., Maydanova N.V. Improving methods for determining the adhesion of bitumen to mineral materials [Sovershenstvovanie metodov opredeleniya scepneniya bituma s mineral'ny'mi materialami]. News of St. Petersburg State Technical University (TU). 2018. No. 42 (68). Pp. 58–61. (rus)
8. Abdullin A.I., Emelyanycheva E.A., Diyarov I.N. Evaluation of the adhesion of bitumen to mineral material in asphalt concrete based on its wetting properties [Ocenka adgezii bituma k mineral'nomu materialu v asfal'tobeton na osnove ego smachivayushhix svoystv]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2009. T. 4. Pp. 256–259. (rus)
9. Emelyanycheva E., Abdullin A. The modification of road petroleum bitumen with petrochemical wastes and polymers. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2021. Vol. 56. No. 6. Pp. 1249–1255.
10. Abdullin A.I., Emelyanycheva E.A. Water-bitumen emulsions based on surfactants of various types. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Vol. 55. No 1. Pp. 73–80.
11. Ivkin A.S. Assessment of the adhesion of bitumen to mineral materials [Ocenka scepneniya bituma s mineral'ny'mi materialami]. Problems of subsoil use: Sat. scientific tr. international forum-competition of young scientists. St. Petersburg: RIC of Mining University. 2016. Pp. 212–213. (rus)
12. Vasil'ev V.V., Ivkin A.S., Salamatova E.V., Kondrasheva N.K., Givirovskiy G.S. The patterns of bitumen distribution onto surfaces of different mineral materials. Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018. 11th. 2019. Pp. 353–358.
13. Lupanov A.P., Fotiadi A.A., Silkin V.V., Gnezdilova S.A., Gulyaev K.M. Influence of asphalt granulate on asphalt concrete properties. AIP Conference Proceedings. 2023. Pp. 80–85.
14. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Study of the flow of bitumen binder, described by the Ostwald-de Weil model, in a cylindrical pipe [Issledovanie techeniya bitumnogo vyazhushhego, opisy'vaemogo model'yu Ostval'da – de Vejlya, v cilindricheskoj trube]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2020. Pp. 171–192. (rus)
15. Pereygin D.N., Boichuk I.P., Grinek A.V., Kozlov V.K. Theoretical study of the flow of cement raw material sludge through pipes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No 552(1). 012037. DOI:10.1088/1757-899X/552/1/012037

Savichev, Alexander O. Postgraduate student. E-mail: alex.savichev@inbox.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Sharapov, Rashid R. DSc, Professor. E-mail: ptdm_zavkaf@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Agarkov, Alexander M. PhD. E-mail: AgarkovAM@mgsu.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 25.10.2023

Для цитирования:

Савичев А.О., Шарапов Р.Р., Агарков А.М. Исследование процесса вспенивания битума в смесителе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 106–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-106-114

For citation:

Savichev A.O., Sharapov R.R., Agarkov A.M. Study of the foaming process of bitumen in the mixer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 106–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-106-114

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-115-123

¹Чумиков Ю.А., ^{1,2}Родионов Ю.В., ^{1,*}Скоморохова А.И., ¹Соколов М.В., ¹Гливенкова О.А.,
¹Сухова О.А.¹Тамбовский государственный технический университет²Мичуринский государственный аграрный университет

*E-mail: nasta373@mail.ru

ВЫБОР ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА ДЛЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ВАКУУМНЫМ ОТВОДОМ

Аннотация. Использование порошков представляет интерес во многих отраслях промышленности. При этом степень измельчения материалов зависит от целевого назначения, в частности при производстве красок необходимо обеспечить определенную тонкость помола пигмента. Чем мельче частицы, тем выше его укрывистость. Однако, чрезмерно высокая тонкость помола может снизить кроющую способность пигмента. Предлагается производить измельчение пигмента в двухсекционной цилиндрикоконической шаровой мельнице с вакуумным отводом частиц заданной степени помола. В статье описана конструкция мельницы и приведена схема линии вакуумного транспортирования измельчаемого пигмента. Цель работы заключается в определении основных параметров вакуумной линии пневмотранспорта при измельчении твердых органических материалов с помощью шаровой мельницы с вакуумным отводом. Приведена методика расчета геометрических, кинематических и динамических параметров разработанной мельницы и линии пневмотранспорта. Значительное сокращение затрат энергии на лишний помол осуществляется за счет своевременного вакуумного отвода измельченных частиц. Вакуум в системе создается и поддерживается жидкостнокольцевым вакуумным насосом. Описаны различные варианты работы разработанной установки: непосредственное измельчение; дополнительное измельчение и рециркуляция дополнительной жидкости, образующейся в процессе работы жидкостнокольцевого вакуумного насоса, что способствует дополнительному сокращению энергетических затрат при измельчении.

Ключевые слова: измельчение, пигмент, двухсекционная шаровая мельница, пневмотранспорт, жидкостнокольцевой вакуумный насос.

Введение. Вопрос организации процессов измельчения является одним из наиболее важных в химической, нефтяной, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности. Измельчение твердых тел до частиц малых размеров осуществляется с целью повышения эффективности различных процессов, в том числе и гетерогенных. Часто использование твердых материалов без предварительного измельчения вообще невозможно [1].

Рассмотрим измельчение сухих органических материалов в порошки, необходимые для применения в химической промышленности, в частности для лакокрасочной отрасли. Здесь степень помола органических материалов (пигментов) является ключевым звеном при создании нового, качественного продукта. Пигменты представляют собой натуральные красящие вещества, обычно порошкообразные и обычно нерастворимые в воде и некоторых других органических растворителях. Эти натуральные материалы являются важным компонентом при производстве красок и покрытий. Сегодня промышленная значимость пигмента расширяет его применение в качестве основного красящего материала не только в производстве красок и чернил, но и в других областях, включая пластмассовую, рези-

новую, косметическую, бумажную и фармацевтическую промышленность, благодаря его выдающимся физико-химическим свойствам [2].

Значимой характеристикой измельченных пигментов является тонкость помола. Чем меньше частицы порошка, тем выше укрывистость пигмента, однако слишком высокая тонкость помола становится причиной снижения красящей способности пигмента [3]. Порошки изготавливают из предварительно высушенных органических материалов, а во время измельчения производят их подсушку.

Для получения порошка тонкого помола интерес представляют шаровые барабанные мельницы [4], в которых измельчение происходит за счет удара, раздавливания и истирания. Несмотря на перспективность использования таких мельниц в различных отраслях промышленности, их энергоемкость достаточно высока, что обуславливает необходимость решения задачи снижения затрат энергии на процесс измельчения в шаровых барабанных мельницах [5].

На энергопотребление влияют не только технология измельчения и свойства перерабатываемого материала, в частности его механическое поведение, но и режим загрузки и скорость подачи энергии. Измельчающее устройство контро-

лирует способ подачи энергии к материалу и механизмы ее рассеивания, участвующие в этом процессе, такие как, например, трение. Чем меньше становятся частицы измельчаемого материала, тем больше энергии требуется на осуществление их помола [6], что осложняет задачу повышения энергоэффективности процесса.

В данной работе предлагается возможное решение проблемы энергозатратности измельчения. Частицы, достигшие определенных размеров целесообразно отводить из зоны измельчения, чтобы они не мешали помолу остальной массы пигмента. Для этого разработана конструкция двухсекционной цилиндрикоконической шаровой мельницы (ДШМ) с вакуумным отводом частиц заданной степени помола. Помимо своевременного отвода частиц определенных размеров, данная установка обеспечивает подсушку сырья и его перемешивание [7].

Целью статьи является определение основных параметров вакуумной линии пневмотранспорта при измельчении твердых органических материалов (пигментов) с помощью шаровой мельницы с вакуумным отводом.

Методика. За основу разрабатываемой методики расчета двухсекционной мельницы взяты положения теории измельчения [1, 8–10]. Разрабатываемая методика расчета вакуумного транспортирования основана на законах течения газов, теории вакуумирования и рекомендациях по проектированию вакуумных насосов [11–13].

Экспериментальные исследования двухсекционной цилиндрикоконической шаровой мель-

ницы с вакуумным отводом проведены в лаборатории НОЦ ТГТУ-МичГАУ «Экотехнологии им. Ю.Г. Скрипникова» на экспериментальной установке, конструкция и принцип работы которой изложены в патенте [14]. Разработанная ДШМ с вакуумным отводом частиц снижает энергозатраты на процесс получения порошков, в частности, пигментов, заданной степени помола за счет исключения из процесса лишнего измельчения.

Основная часть. Для организации работы предлагаемой установки одним из основных направлений является рассмотрение работы вакуумной линии на базе жидкостнокольцевого вакуумного насоса (ЖВН). ЖВН здесь организует вакуумный транспорт измельченных до заданной степени помола частиц из ДШМ в емкость сбора органического порошка (пигмента). Кроме того, в линии предусмотрен возврат частиц обратно в мельницу с целью дополнительного помола.

Для наглядного изображения разделим вакуумно-транспортную линию разработанной установки на участки А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И, как показано на рисунке 1.

Измельчаемый материал загружается в ДШМ 2 (рис. 1), слева от которой установлен жиклер 1. Разряжением, создаваемым жидкостнокольцевым вакуумным насосом (ЖВН) 4 [15], измельченный до заданной степени помола пигмент поступает в циклон-накопитель 3. Клапан 12 служит для дозирования материала при транспортировке в циклон-накопитель 3. Величина вакуума регулируется клапаном 8.

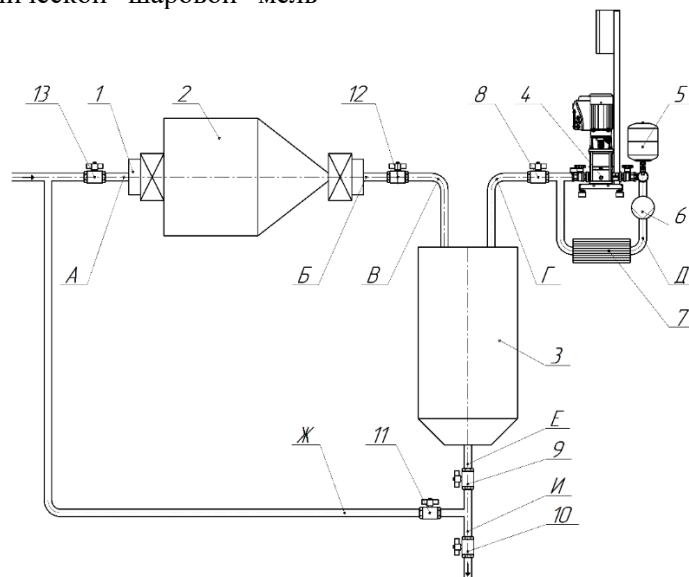


Рис. 1. Линия вакуумного транспортирования измельчаемого пигмента: 1 – торцевое уплотнение; 2 – двухсекционная шаровая цилиндрикоконическая мельница; 3 – циклон-накопитель; 4 – жидкостнокольцевой вакуумный насос; 5 – резервуар; 6 – клапан регулировочный; 7 – радиатор; 8 – клапан регулировочный (отвечает за регулировку вакуума); 9 – клапан регулировочный (отвечает за накопление материала в бункере); 10 – клапан регулировочный (отвечает за выгрузку материала); 11 – клапан регулировочный (отвечает за возврат материала на повторное измельчение); 12 – клапан регулировочный (отвечает за силу вытягивания); 13 – клапан регулировочный (отвечает за подачу материала)

На первом этапе происходит удаление воздуха при закрытых клапанах 12 и 9 и открытом клапане 8. Создается разрежение с давлением p_1 таким образом, чтобы при открытии клапана 12 происходило выравнивание давлений до давления p_n , которое соответствует давлению уноса 50 % частиц от начальной величины.

При этом вакуумно-транспортная система имеет несколько линий: основная и вспомогательные линии. Основная разделена на четыре участка [16]: А, Б, В, Г. Вспомогательные линии включаются по необходимости и состоят из участков: Д – линия рециркуляции дополнительной жидкости ЖВН; Е, Ж – линия транспортирования на дополнительное измельчение; И – линия отгрузки измельченного материала.

Участок А характеризует всасывание воздушной массы А. Участок Б отвечает за установившееся течение смеси частиц заданного помола с воздухом. Участок В показывает путь торможения. Последний участок основной линии Г отвечает за удаление воздушной смеси.

В случае невозможности своевременного отвода частиц заданной степени помола действует дополнительная линия, в которой измельченный до промежуточной степени помола материал (пигмент) возвращается обратно в ДШМ. Для этого включается дополнительная линия, состоящая из участков Е, Ж, И. При открытом клапане 9 материал может подаваться через участок Е либо на дополнительное измельчение по участку Ж (при открытом клапане 11), либо на отгрузку и

вывод из линии по участку И (при открытом клапане 10).

Линия Д отвечает за использование дополнительной жидкости вакуумного насоса. Она состоит из резервуара 5 для сбора жидкости, образующейся в процессе работы ЖВН, радиатора 7, охлаждающего жидкость, и клапана 6, который включает циркуляцию жидкости. Данная линия включается в работу для рециркуляции и охлаждения дополнительной жидкости, что исключает необходимость в постоянном подводе жидкости для обеспечения работы ЖВН.

В различных случаях работы транспортных систем необходимо правильно организовать пуск вакуумно-транспортной системы. Для этого проводится расчет и выбор входящего в состав линии оборудования (трубопроводы, циклон-накопитель, ЖВН), выбор клапанов, организация порядка работы и автоматизированного управления.

Корректная работа предлагаемой ДШМ возможна при правильно организованном отводе частиц. Алгоритм расчета (выбора) элементов вакуумной транспортной системы вместе с ЖВН необходимо выполнять в следующей последовательности.

На первом этапе определяем геометрические размеры ДШМ (рис. 2). В расчетах принимаем количество загружаемого материала в мельницу, как общее количество материала, деленное на количество загрузок n равное 2.

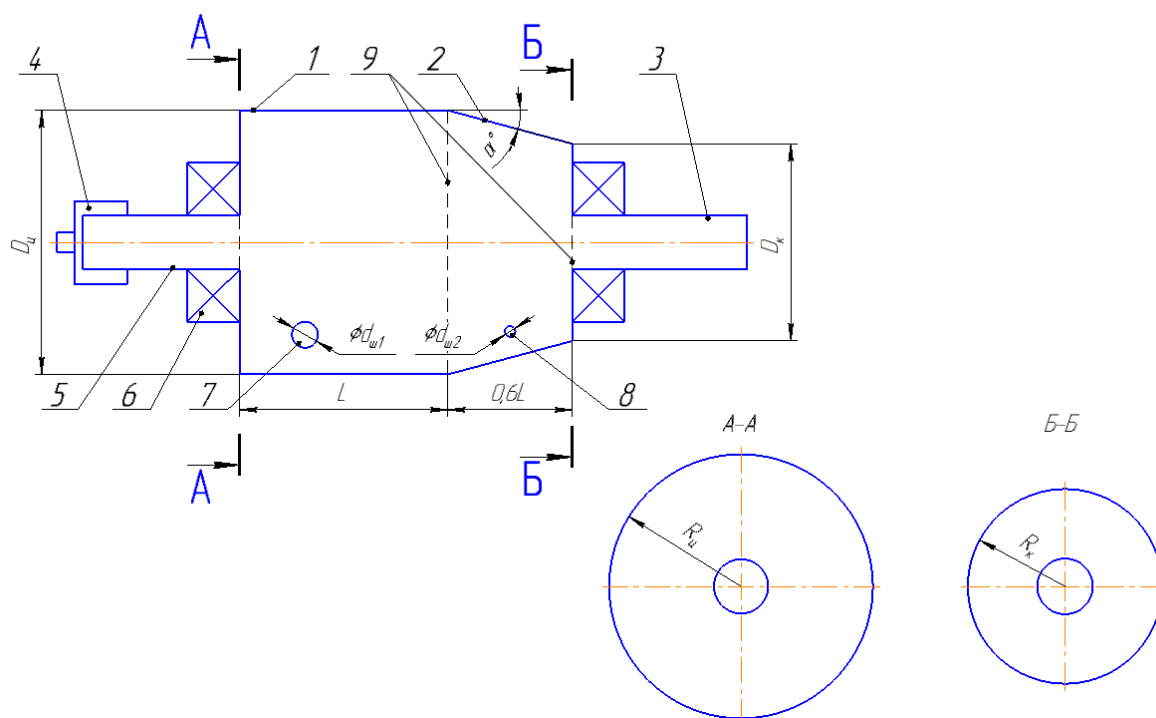


Рис. 2. Цилиндроконическая шаровая мельница: 1 – цилиндрическая секция; 2 – коническая секция; 3 – выпускной патрубок; 4 – жиклер; 5 – впускной патрубок; 6 – подшипники качения; 7 – шар большого диаметра; 8 – шар малого диаметра; 9 – решетка перфорированная

Наиболее эффективным для измельчения режимом работы мельницы считается режим, при котором мелющие тела движутся по траек-

ториям, изображенным на рисунке 3. При таком режиме работы материал измельчается за счет интенсивных ударов, раздавливания и истирания мелющими телами.

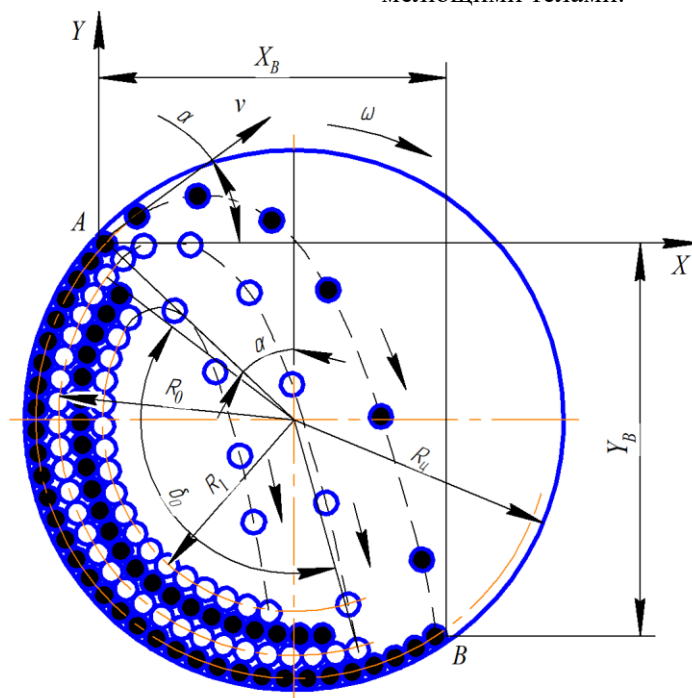


Рис. 3. Схема движения шаров во вращающемся барабане [17]

Порядок расчета покажем на примере цилиндрической секции.

Коэффициент заполнения цилиндрической секции определяется отношением объема загрузки к полному объему секции. Обычно принимается: $\varphi_3 = 0,26 \dots 0,32$.

При значении загрузки:

$$\varphi_3 = \frac{V_3}{V_{ц}} = 0,3, \quad (1)$$

где V_3 – объем загрузки, м^3 ; $V_{ц}$ – полный объем цилиндрической секции, м^3 .

Радиусы (рис. 3) принимают следующие значения

$$R_1 = 0,7 R_{ц}, \quad (2)$$

где R_1 – внутренний радиус расположения центров мелющих шаров при работе мельницы, м; $R_{ц}$ – внутренний радиус цилиндрической секции, м.

Внутренний диаметр цилиндрической секции:

$$D_{ц} = 2 R_{ц}. \quad (3)$$

Большое влияние на интенсивность измельчения оказывают: скорость вращения барабана мельницы, количество и размер мелющих тел, среда измельчения, в которой осуществляется процесс измельчения. При работе мельницы с увеличением ее скорости вращения увеличивается центробежная сила и угол подъема измельчаемых и мелющих тел, вследствие чего тела па-

дают вниз с большей высоты (рис. 3), и производится главным образом дробящее действие. Дальнейшее увеличение скорости вращения мельницы приводит к росту центробежной силы так, что в некоторый момент времени измельчаемые и мелющие тела будут вращаться вместе с барабаном и материал практически не будет измельчаться. Это становится причиной остановки процесса измельчения.

Скорость, при которой наблюдается подобный режим работы мельницы, называют критической скоростью вращения:

$$n_{кр} = \frac{29,91}{\sqrt{R_{ц}}}. \quad (4)$$

Длину цилиндрической секции принимаем:

$$L = 2 R_{ц}. \quad (5)$$

Коническая секция барабана рассчитывается по аналогичным формулам для двух сечений: среднего и наименьшего.

Диаметр шаров каждой секции ДШМ определяем по формулам:

-первая (цилиндрическая) секция:

$$d_{ш \max 2-1} = 6,00 \sqrt[3]{d_{\max 2-1}}, \quad (6)$$

где $d_{\max 2-1}$ – максимальный размер куса измельченного материала в первой секции, м.

-вторая (коническая) секция:

$$d_{ш \max 2-2} = 6,00 \sqrt[3]{d_{\max 2-2}}, \quad (7)$$

где $d_{\max 2-2}$ – максимальный размер куса измельченного материала во второй секции, м.

Масса загрузки мельницы складывается из массы мелющих тел и массы измельчаемого материала, которую обычно принимают равной 14 % от массы мелющих тел.

Следовательно:

$$m_3 = 1,14m_m = 1,14\pi R_n^2 L \rho \mu, \quad (8)$$

где m_m – масса мелющих тел, кг; L – длина барабана, м; ρ – плотность материала мелющих тел, т/м³; μ – коэффициент неплотности загрузки (для шаров $\mu = 0,57$).

Находим воздушный объем ДШМ:

$$V_{\text{возд, ДШМ}} = V_{\text{ц}} + V_{\text{к}} - V_{\text{п}} - V_{\text{ш2-1}} - V_{\text{ш2-2}} - V_{\text{шп}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{к}}$ – объем конической секции шаровой мельницы, м³; $V_{\text{п}}$ – объем пигмента, м³; $V_{\text{ш2-1}}$ – объем шаров цилиндрической секции ДШМ, м³; $V_{\text{ш2-2}}$ – объем шаров конической секции ДШМ, м³; $V_{\text{шп}}$ – объем перфорированной перегородки, м³.

Объем измельчаемого пигмента можно определить формулой:

$$V_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}} \cdot \varepsilon}{\rho_{\text{п}}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса пигмента, кг; ε – коэффициент порозности; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пигмента, кг/м³.

Производительность установки находим, согласно формуле [7]:

$$Q_{\text{в}} = \frac{G_{\text{м}} \cdot v_{\text{ср}}^2}{2p} \leq S_{\text{ф}}(p), \quad (10)$$

где $G_{\text{м}}$ – производительность установки по растительному сыпучему материалу, кг/с; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость материала, м/с; p – начальное давление воздуха на входе в транспортный трубопровод, кПа; $S_{\text{ф}}(p)$ – фактическая быстрота действия (производительность) при полученном давлении всасывания, м³/с.

Давление всасывания ЖВН находим по формуле:

$$p_{\text{вс}} = p_{\text{кр}} + \Delta p, \quad (11)$$

где $p_{\text{кр}}$ – критическое давление поднятия частиц, кПа; Δp – общие потери давления в установке, кПа;

Частицы измельчаемого материала транспортируем вакуумным воздушным потоком при создании скорости потока выше критической, которую, считаем, как [18]:

$$v_{\text{кр}} = B \cdot \sqrt{\frac{g \cdot D_{\text{ц}}}{v_{\text{вит}}^2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{в}}}{\rho} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{в}}}\right)^2} \cdot K, \quad (12)$$

где B – коэффициент транспортирования, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{см}}$ – значение плотности транспортируемой аэросмеси, кг/м³; $\rho_{\text{в}}$ – значение плотности воздуха, кг/м³; $\rho_{\text{тв}}$ – значение плотности твердых частиц, кг/м³; $v_{\text{вит}}$ – скорость витания частиц, м/с; K – дополнительный безразмерный коэффициент, учитывающий физико-химические свойства измельчаемых материалов.

При этом находим скорость витания по формуле:

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{C_{\text{х}} \cdot A_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{в}}}}, \quad (13)$$

где m – масса частицы, кг; $C_{\text{х}}$ – безразмерный коэффициент сопротивления при обтекании частицы воздушным потоком; $A_{\text{м}}$ – площадь миделева сечения частицы, м².

Выбираем действительную быстроту действия и соответственно типоразмер ЖВН по расходу воздуха при разрежении $p=0$ кПа.

$$Q_{\text{в}} = S_{\text{д}}, \quad (14)$$

где $S_{\text{д}}$ – действительная быстрота действия (производительность) ЖВН, м³/с.

Находим необходимую концентрацию $m_{\text{к}}$ пигмента в вакуумном режиме:

$$m_{\text{к}} = \frac{G_{\text{м}}}{S_{\text{д}}}. \quad (15)$$

Определяем диаметр вакуумно-транспортных трубопроводов установки:

$$d_{\text{тт}} = d_{\text{вт}} \cdot \sqrt{1 + m_{\text{к}}^2 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{н}}}\right)^2}, \quad (16)$$

где $d_{\text{вт}}$ – диаметр всасывающего трубопровода, м.

Общие потери давления вычисляем по формуле:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тех}} + \Delta p_{\text{тт}} + \Delta p_{\text{вт}}, \quad (17)$$

где $\Delta p_{\text{тех}}$ – потери давления в технологическом оборудовании, кПа; $\Delta p_{\text{тт}}$ – потери в транспортном трубопроводе, кПа; $\Delta p_{\text{вт}}$ – потери давления в воздушном трубопроводе, кПа.

Составляющие потерь давления определяем по формулам, приведенным в работе [7].

Каждому давлению разрежения соответствует размер частицы, подлежащий уносу. Производительность пневмотранспортирования определяется быстротой действия ЖВН. Алгоритм работы, следующий (рис. 2):

- закрываем заслонки (поз. 12, 9);
- открываем заслонку (поз. 8);
- создаем разрежение в трубопроводах и циклоне накопителе до давления p_1 ;

- давление в ДШМ равно $p_2=101,3$ кПа=1 атм.;

- открываем задвижку (поз. 12);
- закрываем задвижку (поз. 8);
- задвижки (поз 13, 9) держим закрытым.

Запишем формулу выравнивания давлений для сообщающихся сосудов:

$$p_1V_1 + p_1V_2 + p_2V_{\text{возд., ДШМ}} = p_n(V_1 + V_2 + V_{\text{возд., ДШМ}}), \quad (18)$$

где V_1 – объем циклона-накопителя, м³; V_2 – объем трубопроводов системы, м³; p_n – давления подъема частиц пигмента, кПа.

Тогда

$$p_n = \frac{p_1V_1 + p_1V_2 + p_2V_{\text{возд., ДШМ}}}{V_1 + V_2 + V_{\text{возд., ДШМ}}}. \quad (19)$$

При условии, что p_n соответствует давлению подъема частицы ($p_n=0,5m_n$), определяем V_1 и V_2 .

Далее определяем общее давление начала измельчения при открытии заслонки (поз. 12), то есть начало вакуумного пневмотранспортирования. Причём давление не должно удалять частицы по размеру в два раза меньшего начальному. После этого идет дальнейшая откачка и пневмотранспортирование частиц до достижения ими определенной степени помола.

Последний этап расчета – выбор ЖВН по предельному давлению разряжения и подбор клапанов для системы пневмотранспорта.

Если невозможно подобрать ЖВН с нужным предельным давлением разряжения, осуществляется выбор ближайшего по величине вакуума и проводится расчет дополнительной линии транспортирования – возврата частиц определенного размера в ДШМ на дополнительный помол с последующим их транспортированием по участкам основной линии.

С целью повышения экономии энергии при измельчении пигментов будут разработаны новые конструкции ЖВН, в частности ЖВН с вращающимся корпусом и регулируемым нагнетательным окном, то есть вакуумный насос комбинированного типа (ЖВН КМ), разработанного на кафедре «МИГ ФГБОУ ВО «ТГТУ». Кроме того, важным вопросом, подлежащим изучению, является автоматизация работы линии вакуумного транспортирования.

Выводы.

1. Представлена конструкция разработанной двухсекционной цилиндрикоконической шаровой мельницы с вакуумным отводом частиц для измельчения пигмента. Частицы заданной степени помола транспортируются за счет вакуума, создаваемого жидкостнокольцевым вакуумным насосом.

2. Предложена методика расчета линии пневмотранспорта для организации вакуумного

отвода частиц определенной степени помола при работе шаровой мельницы.

3. Приведен расчет основных геометрических параметров шаровой мельницы и представлена организация линий пневмотранспортирования: основной и дополнительной.

4. Предложена линия рециркуляции дополнительной жидкости, образующейся в работе жидкостнокольцевого вакуумного насоса, позволяющая сократить энергию, затрачиваемую на подвод жидкости.

5. Представлены основные формулы для выбора ЖВН по скорости действия и давлению разряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ходаков Г.С. Физика измельчения: монография. М.: «Наука», 1972. 306 с.
2. Agbo C., Jakpa W., Sarkodie B., Boakye A., Fu S. A review on the mechanism of pigment dispersion // Journal of Dispersion Science and Technology. 2018. Vol. 39. № 6. Pp. 874–889. DOI: 10.1080/01932691.2017.1406367
3. Фрейтаг В., Стойе Д. Краски, покрытия и растворители: пер. с англ. под ред. Э.Ф. Ицко. СПб: Профессия, 2012. 528 с.
4. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычёв Е.А. Состояние и направления развития техники и технологии измельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 110–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116
5. Иванов С.Д., Кудряшов А.Н., Ощепков В.В. Модель оптимизации параметров размола шаровой барабанной мельницы ШК-32 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 10(117). С. 128–134. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-128-134
6. Blanc N., Mayer-Laigle, C., Frank, X., Radjai, F., Delenne, J.-Y. Evolution of grinding energy and particle size during dry ball-milling of silica sand // Powder Technology. 2020. Vol. 376. Pp. 661–667. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.048
7. Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Данилин С.И., Чумиков Ю.А., Скоморохова А.И., Родионов Ю.Ю. Теоретический расчет двухступенчатого измельчителя сухих растительных материалов заданной степени помола с применением вакуума // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 3(70). С. 32–41. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_32
8. BadJena S.K., Mishra B.K. Optimization of variables in grinding brass particles for paint and pigment industry // Powder Technology. 2011. Vol. 214. № 3. Pp. 349–355. DOI:10.1016/j.powtec.2011.08.030

9. Осипов Д.А. Совместное измельчение и классификация разнородных компонентов для выделения целевого продукта: дисс. ... кандидата техн. наук. Иваново, 2019. 139 с.

10. Шувалов С.И. Михеев П.Г. Распределение мелющих шаров и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана мельницы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 2. С. 26–32.

11. Райзман И.А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры. Казань: Казанский гос. техн. ун-т, 1995. 258 с.

12. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel construction of liquid ring vacuum pumps // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 55. № 5-6. Pp. 473–479. DOI: 10.1007/s10556-019-00648-z

13. Родионов Ю.В. Совершенствование теоретических методов расчета и обоснование параметров и режимов жидкостнокольцевых вакуумных насосов с учетом особенностей технологических процессов в АПК : дис. ... д-ра техн. наук. Тамбов, 2013. 434 с.

14. Пат. 2805071, Российская Федерация, МПК В02С 17/00. Шаровая мельница / Ю.Ю. Родионов, А.И. Скоморохова, Ю.В. Родионов, Д.В.

Никитин, Ю.А. Чумиков, С.Н. Аникин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». № 2022131691; заявл. 05.12.2022; опубл. 11.10.2023. Бюл. № 29. 7 с.

15. Пат. 2784993, Российская Федерация, МПК F04С 7/00, F04С 19/00. Жидкостно-кольцевая машина / Д.В. Никитин, Ю.В. Родионов, А.С. Зорин; заявитель и патентообладатель ООО «ТЕХЛАЙН». № 2021128067; заявл. 23.09.2021; опубл. 01.12.2022. Бюл. № 34. 18 с.

16. Родионов Ю.В., Капустин В.П., Кобелев А.В., Никитин Д.В., Платинин П.С. Повышение эффективности механизации транспортирования сухих сыпучих растительных материалов // Инновационная техника и технология. 2017. № 1 (10). С. 9–15.

17. Гусев Ю.И., Карасев И.Н. Конструирование и расчет машин химических производств. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.

18. Шиманова А.А. Теоретическое обоснование работы всасывающего заборного устройства пневмотранспортной установки // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-2. С. 466–471.

Информация об авторах

Чумиков Юрий Анатольевич, аспирант кафедры механики и инженерной графики. E-mail: chumikovi@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Родионов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики. E-mail: rodionow.u.w@rambler.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2. Мичуринский государственный аграрный университет. Россия, 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101.

Скоморохова Анастасия Игоревна, аспирант кафедры компьютерно-интегрированных систем в машиностроении. E-mail: nasta373@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Соколов Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерно-интегрированных систем в машиностроении. E-mail: msok68@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Гливленкова Ольга Анатольевна, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков. E-mail: olga-glivenkova@rambler.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Сухова Анна Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры природопользование и защита окружающей среды. E-mail: eso@mail.tstu.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Поступила 02.11.2023 г.

© Чумиков Ю.А., Родионов Ю.В., Скоморохова А.И., Соколов М.В., Гливленкова О.А., Сухова О.А., 2023

¹Chumikov Yu.A., ^{1,2}Rodionov Yu.V., ^{1,*}Skomorokhova A.I., ¹Sokolov M.V., ¹Glivenkova O.A.,
¹Sukhova O.A.

¹Tambov State Technical University

²Michurinsk State Agrarian University

*E-mail: nasta373@mail.ru

SELECTION OF LIQUID RING VACUUM PUMP FOR BALL MILL WITH VACUUM OUTLET

Abstract. The use of powders is of interest in many industries. At the same time, the degree of grinding of materials depends on the intended purpose; in particular, in the production of paints, it is necessary to ensure a certain fineness of grinding of the pigment. The smaller the particles, the higher its hiding power. However, excessively high grinding fineness may reduce the hiding power of the pigment. It is proposed to grind the pigment in a two-section cylindrical-conical ball mill with vacuum removal of particles of a given degree of grinding. The article describes the design of the mill and shows a diagram of the line for vacuum transportation of the crushed pigment. The purpose of the work is to determine the main parameters of the vacuum line of pneumatic transport when grinding solid organic materials using a ball mill with a vacuum outlet. A method for calculating the geometric, kinematic and dynamic parameters of the developed mill and pneumatic transport line is presented. A significant reduction in energy costs for excess grinding is achieved through timely vacuum removal of crushed particles. The vacuum in the system is created and maintained by a liquid ring vacuum pump. Various options for the operation of the developed installation are described: direct grinding; additional grinding and recirculation of additional liquid generated during the operation of the liquid ring vacuum pump, which further reduces energy costs during grinding.

Keywords: grinding, pigment, two-section ball mill, pneumatic transport, liquid ring vacuum pump.

REFERENCES

1. Khodakov G.S. Physics of grinding: monograph [Fizika izmel'chenija: monografija]. M.: Nauka. 1972, 306 p. (rus)
2. Agbo C. Jakpa W., Sarkodie B., Boakye A., Fu S. A review on the mechanism of pigment dispersion. Journal of Dispersion Science and Technology. 2018. Vol. 39. № 6. Pp. 874–889. DOI: 10.1080/01932691.2017.1406367
3. Freytag V., Stojic D. Paints, coatings and solvents: trans. from English edited by E.F. Itsko [Kraski, pokrytija i rastvoriteli: per. s angl. pod red. Je.F. Icko]. St. Petersburg: Profession, 2012. 528 p. (rus)
4. Bogdanov V.S., Anciferov S.I., Bogdanov D.V., Sychjov E.A. State and directions of development of grinding equipment and technology [Sostojanie i napravlenija razvitija tehniki i tehnologii izmel'chenija]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 110–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116 (rus)
5. Ivanov S.D., Kudryashov A.N., Oshchepkov V.V. Model for optimizing the grinding parameters of the ShK-32 ball drum mill [Model' optimizacii parametrov razmola sharovoj barabannoj mel'nicy ShK-32]. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20. No. 10 (117). Pp. 128–134. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-128-134 (rus)
6. Blanc N., Mayer-Laigle, C., Frank, X., Radjai, F., Delenne, J.-Y. Evolution of grinding energy and particle size during dry ball-milling of silica

sand. Powder Technology. 2020. Vol. 376. Pp. 661–667. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.048

7. Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Danilin S.I., Chumikov Yu.A., Skomorokhova A.I., Rodionov Yu.Yu. Theoretical calculation of a two-stage grinder of dry plant materials of a given degree of grinding using vacuum [Teoreticheskij raschet dvuhstupenchatogo izmel'chitelja suhih rastitel'nyh materialov zadannoj stepeni pomola s primeneniem vakuuma]. Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2021. Vol. 14. No. 3(70). Pp. 32–41. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_32 (rus)
8. BadJena S.K., Mishra B.K. Optimization of variables in grinding brass particles for paint and pigment industry. Powder Technology. 2011. Vol. 214. № 3. Pp. 349–355. DOI:10.1016/j.powtec.2011.08.030
9. Osipov D.A. Joint grinding and classification of dissimilar components for isolating the target product [Sovmestnoe izmel'chenie i klassifikacija raznorodnyh komponentov dlja vydelenija celevogo produkta]: diss. ... candidate of technical sciences. Ivanovo, 2019. 139 p. (rus)
10. Shuvalov S.I., Mikheev P.G. Distribution of grinding balls and grinded material in the cross section of the rotating drum of the mill [Raspredelenie meljushhih sharov i razmalyvaemogo materiala v poperechnom sechenii vrashhajushhegosja barabana mel'nicy]. Vestnik IGEU. 2009. No. 2. Pp. 26–32. (rus)
11. Raizman I.A. Liquid ring vacuum pumps and compressors [Zhidkostnokol'cevyje vakuumnye

nasosy i kompressory]. Kazan: Kazan State. tech. Univ., 1995. 258 p. (rus)

12. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel construction of liquid ring vacuum pumps. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019. Vol. 55. No. 5–6. Pp. 473–479. DOI: 10.1007/s10556-019-00648-z

13. Rodionov Yu.V. Improvement of theoretical calculation methods and justification of parameters and modes of liquid ring vacuum pumps taking into account the features of technological processes in the agro-industrial complex [Sovershenstvovanie teoreticheskikh metodov rascheta i obosnovanie parametrov i rezhimov zhidkostnokol'cevyyh vakuumnykh nasosov s uchetom osobennostey tehnologicheskikh processov v APK]: dis. ... Dr. Tech. Sciences. Tambov, 2013. 434 p. (rus)

14. Rodionov Yu.Yu., Skomorokhova A.I., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Chumikov Yu.A., Anikin S.N. Ball mill. Patent RF, no. 2022131691, 2022.

15. Nikitin D.V., Rodionov Yu.V., Zorin A.S. Liquid ring machine. Patent RF, no. 2021128067. 2021.

16. Rodionov Yu.V., Kapustin V.P., Kobelev A.V., Nikitin D.V., Platitsin P.S. Increasing the efficiency of mechanization of transportation of dry bulk plant materials [Povyshenie jeffektivnosti mehanizacii transportirovaniya suhih sypuchih rastitel'nyh materialov]. *Innovative Machinery and Technology*. 2017. No. 1 (10). Pp. 9–15. (rus)

17. Gusev Yu.I., Karasev I.N. Design and calculation of chemical production machines [Konstruirovaniye i raschet mashin himicheskikh proizvodstv]. M.: Mechanical Engineering, 1985. 408 p. (rus)

18. Shimanova A.A. Theoretical substantiation of the operation of the suction intake device of a pneumatic transport installation [Teoreticheskoe obosnovanie raboty vsasyvajushhego zabornogo ustrojstva pnevmotransportnoj ustanovki]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012. No. 11–2. Pp. 466–471. (rus)

Information about the authors

Chumikov, Yuri A. Postgraduate student. E-mail: chumikovi@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2.

Rodionov, Yuri V. DSc, Professor. E-mail: rodionow.u.w@rambler.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2. Michurinsk State Agrarian University. Russia, 393760, Tambov region, Michurinsk, st. International, 101.

Skomorokhova, Anastasia I. Postgraduate student. E-mail: nasta373@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2.

Sokolov, Mikhail V. DSc, Professor. E-mail: msok68@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2.

Glivenkova, Olga A. PhD. E-mail: olga-glivenkova@rambler.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2.

Sukhova, Anna O. PhD. E-mail: eco@mail.tstu.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5, room 2.

Received 02.11.2023

Для цитирования:

Чумиков Ю.А., Родионов Ю.В., Скоморохова А.И., Соколов М.В., Гливенкова О.А., Сухова О.А. Выбор жидкостнокольцевого вакуумного насоса для шаровой мельницы с вакуумным отводом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 115–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-115-123

For citation:

Chumikov Yu.A., Rodionov Yu.V., Skomorokhova A.I., Sokolov M.V., Glivenkova O.A., Sukhova O.A. Selection of liquid ring vacuum pump for ball mill with vacuum outlet. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 12. Pp. 115–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-115-123

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137

Шамгулов Р.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: shamguloff@mail.ru

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Аннотация. В статье исследованы вопросы агломерирования полидисперсных техногенных материалов с низкой насыпной плотностью, в частности технического углерода (ТУ). Представлены патентозащищенные технические решения и технология переработки органических твердых техногенных материалов, получаемых при переработке ТКО способом низкотемпературного термолиза ($T \leq 500$ °C). Отличительными особенностями разработанных технических средств являются: герметизирующие узлы загрузки и выгрузки без доступа кислорода воздуха, геометрический профиль и конфигурация внутренних рабочих органов, система аспирации и конденсации парогазовой смеси и др. Представлена патентозащищенная конструкция барабанно-винтового агрегата для агломерирования ТУ низкотемпературной термолизной технологии. Проведены исследования ТУ, полученного при переработке органических твердых коммунальных отходов способом низкотемпературного термолиза. Разработана механо-реологическая модель процесса агломерирования исследуемого материала. Проведены теоретические исследования механо-реологической модели постадийного агломерирования полидисперсных материалов. Установлены основополагающие принципы организации технологических процессов гранулообразования на каждой стадии обработки материала и классификации гранулята. Обоснована необходимость использования на различных стадиях элементов (Гука, Ньютона, Сен-Венана и др.) и построенных на их основе механо-реологических моделей объемно-пространственной ориентации частиц ТУ и агломерируемого гранулята. Теоретически обосновано сочетание используемых элементов в моделях Максвелла, Бингмана, Шведова и др., на каждой из стадий процесса агломерирования.

На основании проведенных теоретических исследований и моделирования постадийных процессов агломерирования, разработаны специальные устройства, реализованные в патентозащищенной конструкции барабанно-винтового агрегата комбинированного действия (БВА КД). Разработана конструкторская документация и изготовлен опытно-промышленный образец БВА КД для агломерирования техногенных полидисперсных материалов.

Ключевые слова: низкотемпературный термолиз, агломерирование, технический углерод, барабанно-винтовой агрегат, механо-реологическая модель.

Введение. Человек и природа неотъемлемо связаны между собой. Стремительное развитие промышленности неизбежно приводит к необходимости увеличения добычи полезных ископаемых, производству новых материалов и товаров из них. Растет население планеты, а вслед за ним и потребительская корзина. Все вышеизложенное приводит к увеличению генерируемых человеком отходов. По данным Организации Объединенных Наций (ООН) население планеты на 15.11.2022 составило 8 млрд. человек [1]. Количество отходов, производимых человечеством, ежегодно увеличивается. Согласно данным, приводимых в отчете Росстата, количество образующихся в России отходов производства и потребления в 2021 году составило 8,5 млрд. тонн/год [2]. Актуальность проблемы подтверждается: проводимой в стране реформой обращения с отходами, стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, а также иными принимаемыми законами в области охраны окружающей среды. В Послании Президента РФ Федеральному собранию от 15.01.2020

г. говорилось о необходимости скорейшего перехода на экономику замкнутого цикла. Целью политики, проводимой государством в сфере экологии, является снижение отходов, вывозимых на полигон и увеличение доли отходов, вовлекаемых во вторичный хозяйственный оборот [3].

В мире существуют различные способы переработки органических отходов: биохимическое разложение (компостирование), термическое разложение (пиролиз, сжигание, газификация), депонирование на полигонах ТКО и др. Все способы разделяются на три основных направления. На рисунке 1 представлена схема разделения существующих способов переработки по направлениям. Наиболее перспективным развитием ресурсосберегающих технологий является низкотемпературная термомеханическая переработка – термолиз, обеспечивающая получение из органических ТКО высококалорийной продукции. Данный способ впервые был предложен и опробован в 2010 году в ООО «НПП Термолиз» г. Москва при переработке резиновой крошки из изношенных автомобильных шин [4–5].

Биохимическая переработка – аэробно-анаэробное разложение органической составляющей ТКО [6]. Преимуществом данного способа является переработка органической составляющей ТКО, с получением конечного продукта – биогаза. Недостатком является: необходимость вовлечения в хозяйственный оборот полезных земельных площадей; длительность процесса – до 2-х лет; необходимость дальнейшей переработки неразложившейся составляющей – полимеров, минералов, металлов и др.

Пиролиз, сжигание, газификация – в их основе лежит деструкция отходов под действием

температуры. От 600 °С – при пиролизе, до 1200 °С – при газификации [7]. Преимуществом данного направления является возможность получения большого количества тепловой и электрической энергии. Недостатками – отсутствие качественных конечных продуктов; высокая стоимость заводов сжигания и газификации; выделяемые в процессе работы канцерогенные вещества; необходимость последующей переработки образуемой золы, шлаков, углеродсодержащего остатка.

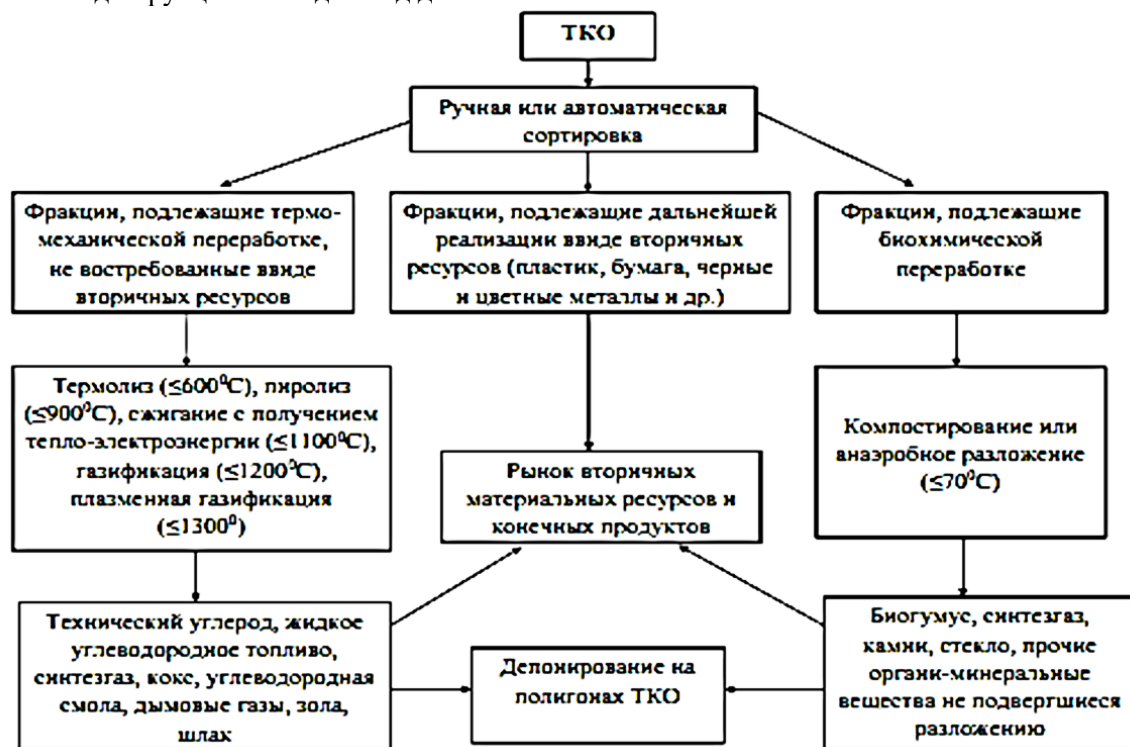


Рис. 1. Схема существующих направлений переработки органических ТКО

Представленные технологии переработки органических техногенных отходов направлены в основном на их депонирование (захоронение) на полигонах, либо на получение тепловой или электрической энергии – сжигание, газификация, пиролиз.

Материалы и методы. Термолиз – инновационный способ термомеханической переработки органических техногенных отходов при низких – ≤ 500 °С температурах. Основным преимуществом технологии является возможность получения востребованных, высококалорийных конечных продуктов. Процентный выход зависит от состава исходного сырья и варьируется в пределах: 1–10 % для синтетического газа (СГ) (3600 ккал/кг); 20–55 % для жидкого углеводородного топлива (ЖУТ) (10500 ккал/кг); 30–45 % для технического углерода (ТУ) (6800 ккал/кг); 2–20 % техническая вода [8–9]. Классическая схема технологического процесса

низкотемпературного термолиза представлена на рисунке 2.

Согласно представленной схеме, предварительно измельченные органические ТКО (автомобильные шины, целлюлозно-бумажные и полимерсодержащие отходы и др.) загружаются в приемный бункер 1, далее транспортером 2 подаются в узел герметичной загрузки 3, откуда поступают в реактор низкотемпературного термолиза 4. В реакторе сырье подвергается термической деструкции ($T \leq 500$ °С) и продвигается к выгрузочной части при помощи транспортирующего органа 5, приводимого во вращение мотор-редуктором 6. В процессе продвижения и термодеструкции без доступа кислорода воздуха сырье разлагается на парогазовую смесь и твердый углеродный остаток (технический углерод). Последний выводится из реактора через узел герметичной выгрузки 7. Парогазовая смесь через

фильтр-сепаратор 8 поступает в ректификационную колонну 9, где разделяется на жидкие продукты (жидкое углеводородное топливо, техническая вода) и газообразные (синтетический газ), дожигаемый в газогорелочном устройстве 10. Жидкие продукты выводятся через соответствующие штуцера на промежуточное хранение и дальнейшее использование по заданным технологическим направлениям.

С использованием результатов многолетних научных исследований, конструкторско-технологических разработок, их патентной защите в стране и за рубежом (патент РФ № 2744225, № 2773396, Евразийский патент № 043162, № 043232) совместно с ИТР ООО «ТК «Экотранс» нами разработаны опытно-промышленные ресурсосберегающие технологические линии ($Q=50$ кг/ч, $Q=500$ кг/ч) низкотемпературной термолитической переработки органических ТКО [10–11].

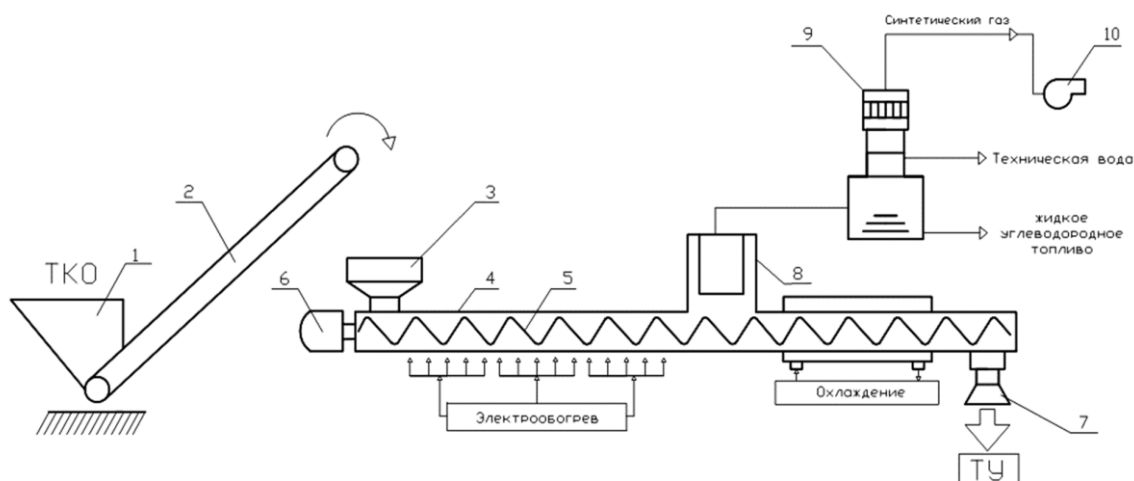


Рис. 2. Технологическая схема низкотемпературного термолитического процесса:

- 1 – приемный бункер измельченных ТКО; 2 – транспортер; 3 – узел герметичной загрузки сырья;
4 – реактор низкотемпературного термолитического процесса; 5 – транспортирующий орган; 6 – мотор-редуктор;
7 – узел герметичной выгрузки твердого продукта из реактора; 8 – фильтр-сепаратор;
9 – ректификационная колонна; 10 – газогорелочное устройство

Отличительными особенностями данного оборудования являются: герметизирующие узлы загрузки и выгрузки без доступа кислорода воздуха, геометрический профиль и конфигурация внутренних рабочих органов, система аспирации и конденсации парогазовой смеси, а также другие системы аппаратного оформления технологического процесса.

Получаемые продукты по своим физико-механическим характеристикам и физико-химическим свойствам близки к своим аналогам, получаемым промышленным способом. Так, например, жидкое углеводородное топливо (ЖУТ) аналогично печному. Характеристики ЖУТ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства жидкого углеводородного топлива

№	Параметры	Ед. изм.	Метод исследования	Результат
1.	Плотность: при 15 °С	кг/м ³	ГОСТ Р 51069	820.0-830.0
2.	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477	Отсутствует
3.	Массовая доля серы	%	ГОСТ 32139	0.65-0.75
4.	Температура вспышки в закрытом тигле	°С	ГОСТ 6356	15.0-25.0
5.	Массовая доля механических примесей	%	ГОСТ 6370	0.012-0.016
6.	Фракционные данные – 50% перегоняется при	°С	ГОСТ 2177 метод Б	224.0
7.	Процентный выход	%	ГОСТ 2177 метод Б	87.0

Низкое содержание серы в исследуемом образце свидетельствуют о возможности применения получаемого жидкого углеводородного топлива в качестве альтернативы мазутам и темному

печному топливу. Плотность мазутов М40 и М100 составляет в среднем 950-970 кг/м³. Это вызывает определенные трудности при их приме-

нении в условиях пониженных ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. Для снижения вязкости и температуры застывания в мазут добавляют до 10–15 % дизельных фракций. Жидкое углеводородное топливо, получаемое по технологии низкотемпературного термоллиза, имеет плотность $820\text{--}830\text{ кг/м}^3$ и температуру застывания до ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это исключает необходимость проведения подготовительных операций при применении ЖУТ в котельных, а также облегчает его налив, транспортировку и слив в зимний период. Научные работы по использованию ЖУТ в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» в настоящее время продолжаются.

Сбор, хранение, транспортировка и применение по технологическому назначению жидких и газообразных продуктов общеизвестно и не вызывает затруднений. Наибольшее внимание в наших научных разработках уделялось техническому углероду (ТУ) – продукции, используемой в различных отраслях промышленности (лакокрасочной, химической, строительной и др.). Технический углерод востребован и в других об-

ластях промышленности. Однако в силу специфических характеристик и свойств ТУ (полидисперсность, низкая насыпная плотность, пыление и др.) его применение ограничивается в качестве конечного продукта с высокой добавленной стоимостью, или как исходное сырье для дальнейшего технологического передела. Получаемый при переработке органических ТКО способом низкотемпературной термоллизной технологии ТУ, был исследован в специализированной лаборатории.

С помощью растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450 проводилось измерение размера объекта, выведенного на экран монитора. Результаты исследований свидетельствуют о том, что ТУ имеет полидисперсный состав (10–700 мкм), а частицы имеют неправильную форму. Также, с использованием данного оборудования было проведено исследование элементного состава ТУ. Результаты представлены в таблице 2.

В таблице 3 представлены результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО.

Таблица 2

Элементный состав технического углерода при переработке органических ТКО

Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %
C	66.84	Na	1.27	P	0.33	Mn	0.05
O	14.35	Fe	1.19	S	0.31	Cr	0.03
Ca	6.30	K	1.04	Mg	0.30		
Si	3.42	Al	0.97	Zn	0.23		
Cl	2.71	Ti	0.44	Cu	0.23		

Исследование фазового состава проводилось с использованием рентгеновского дифракто-

метра SmartLab (Rigaku). На рисунке 3 представлен результат исследования фазового состава ТУ.

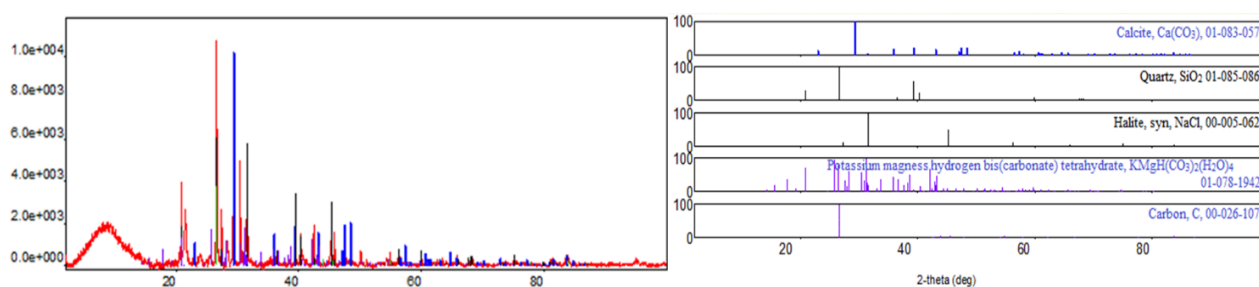


Рис. 3. Рентгеновская порошковая дифрактограмма ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО

Таблица 3

Результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО

Название фазы	Формула	Пространственная группа	Номер карты
Аморфный углерод	C	143 : P3	00-026-1077
Калиймагнев. дигидрокарбонат	$\text{KMgH}(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_4$	2 : P-1	01-078-1942
Галит	NaCl	225 : Fm-3m	00-005-0628
Кварц	SiO_2	152 : P3121	01-085-0865
Кальцит	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	167 : R-3c, гексагональ	01-083-0577

С помощью газо-адсорбционного анализатора TriStar II 3020 были определены такие характеристики ТУ как: удельная поверхность по БЭТ; объем пор; средний размер пор. Результаты

газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО

Удельная поверхность исследуемого образца по однотоочечному методу БЭТ в точке $P/P_0 = 0.266612809$:	33.3527 м ² /г
Удельная поверхность исследуемого образца по пятиточечному методу БЭТ	22.8179 м ² /г
Объем пор в образце при давлении $P/P_0 = 0.984479441$:	0.1148 см ³ /г
Средний размер пор в образце:	145.72 Å

Основная часть. Установленные нами специфические особенности физико-механических характеристик и физико-химических свойств ТУ (широкий диапазон гранулометрического состава – 10÷700 мкм при преобладающем среднем размере частиц 40÷45 мкм; низкая насыпная плотность – 300÷400 кг/м³, склонность к слеживаемости, высокое пыление при транспортировке, а также гидрофобность ввиду малого размера пор 120–150 Å и др.) ограничивают его применение при производстве широкого ассортимента продукции (пластика, красок, резинотехнических изделий и др.). Все это свидетельствует о целесообразности разработки технологии и аппаратного исполнения агрегата для агломерирования высокодисперсного компонента (ТУ), получаемого способом низкотемпературного термоллиза.

Однако, проведенные исследования показали, что при агломерировании ТУ невозможно использовать известные водные растворы связующих из-за малого размера пор частиц, а наличие до 10 % масс. частей кремния и кальция не позволяют использовать общеизвестные для ТУ связующие (силикат натрия, мелассу и др.). В этой связи возникает ряд технических требований при разработке и создании специального агрегата для агломерирования указанного материала.

Агломерирование технического углерода является проблемной и в тоже время актуальной задачей, решение которой не только расширяет потребительские свойства ТУ, но и позволяют реализовать процесс термоллиза технологически завершенным. Для решения поставленной задачи нами был проведен анализ существующих разработок [12–15], а также преимуществ и недостатков известных агломерирующих агрегатов: тарельчатых, роторно-центробежных, пальцевых, барабанных и др. [16–18]. Вышеуказанные особенности ТУ не позволяют использовать данные агрегаты ввиду следующих особенностей: больших габаритных размеров при относительно небольшой производительности, отсутствии герметичности для сильно пылящего материала, ограниченности управления постадийным процессом

гранулообразования, невозможности использования аппаратов экструзионного типа из-за высокой абразивности материала и др. Все это вызвало необходимость разработки и создания агрегата, соответствующего механо-технологическим требованиям. В этой связи, нами был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, конструкторско-технологических разработок и моделирования технологического процесса агломерирования ТУ.

В основу изучаемого процесса агломерирования ТУ и разрабатываемых технических средств были положены классические принципы физико-химической механики, разработанные известными учеными (Л.М. Сулименко, Б.С. Альбац, М.Б. Генералов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Д.А. Макаренков и др.) [19–23]. С учетом условий упруго-вязко-пластического деформирования ТУ со связующим нами разработана механо-реологическая модель постадийного процесса агломерирования с использованием элементов Гука, Ньютона, Сен-Венана и др., объединяющих их моделей. Разработанная механо-реологическая модель, позволяет постадийно исследовать процесс агломерирования технического углерода с учетом его особенностей.

Согласно изученных кинетических закономерностей процессов агломерирования полидисперсных систем, разработанных учеными теоретических положений и их практической реализации [24–26], нами сформулированы следующие концептуальные положения по организации постадийного технологического процесса агломерирования ТУ, с учетом их подтверждения при физическом моделировании на стендовых установках.

Для получения качественного агломерированного продукта из ТУ (заданных размеров и геометрической формы, плотности и прочности гранул, сопротивления истирающим нагрузкам и др.), согласно разработанной механо-реологической модели и результатам моделирования процесса гранулообразования, необходимо, на соответствующей стадии процесса, обеспечивать:

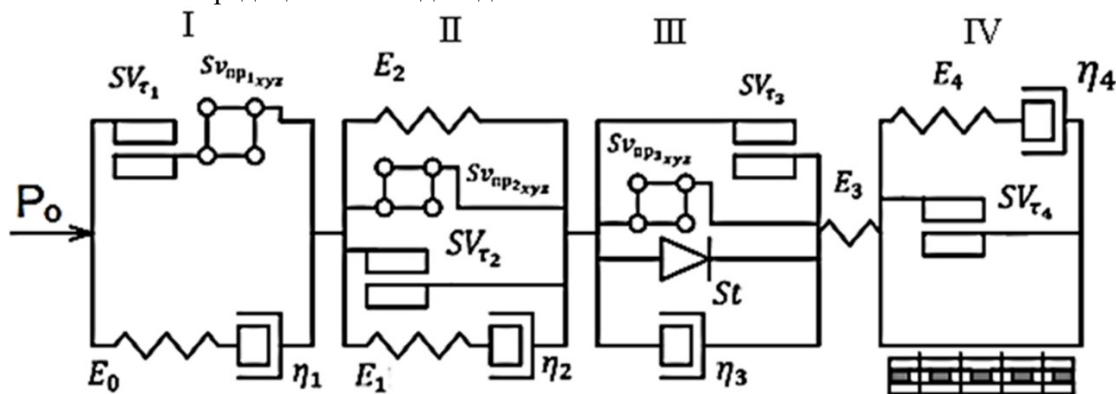
- исходное образование микророзродышей (центров гранулообразования) из гомогенной смеси ТУ с органическим связующим (15 % водный раствор ПАВ), при обеспечении объемно-пространственного перемещения частиц в спиралевидном устройстве;

- для дальнейшего процесса гранулообразования из полученных микророзродышей с низкой исходной насыпной плотностью целесообразно обеспечить упрочнение их поверхностного слоя при объемно-пространственном перемещении в технологическом режиме «рециклинга»;

- с целью повышения эффективности процесса гранулообразования наиболее целесообразно использовать не традиционный водопадно-

каскадный режим с ограниченной траекторией соприкосновения гранулы с боковой поверхностью камеры агломерирования, а каскадный режим – с более протяженной винтообразной траекторией соприкосновения за один период объемно-пространственного силового воздействия на гранулируемый слой;

- для расширения технологических возможностей использования агломерированного ТУ целесообразно осуществлять классификацию полученной агломерированной продукции по её размерам с использованием внутреннего рециклинга сгранулированного материала.



$(E_0 - E_4)$ – элементы Гука и $(\eta_1 - \eta_4)$ элементы Ньютона –соответственно, для каждой стадии агломерирования;

$(SV_{\tau_1} - SV_{\tau_4})$ – элементы Сен-Венана на соответствующей стадии гранулообразования;

$(Sv_{np1xyz} - Sv_{np3xyz})$ – элементы пространственной ориентации частиц;

St – элемент стопор, характеризующий частичное разрушение и образование новых гранул;

Рис. 4. Механо-реологическая модель процесса агломерирования полидисперсного материала на различных стадиях

Процесс формирования микрогранул (зародышей) на первой стадии агломерирования реализуется при упруго-вязком проявлении частиц (тела Гука и Ньютона), с последующим пластическим течением (трение – тело Сен-Венана SV_{mp_1}) и обязательной объемно-пространствен-

ной переориентацией (окачивающим воздействием) микрогранулята в системе координат XYZ (тело Sv_{np1xyz}).

Уравнение деформационного воздействия на микрогранулы на первой стадии агломерирования имеют вид:

$$\varepsilon_I = \bar{\sigma}_e^I (E_0)^{-1} + [\sigma_n^I (\eta_I)^{-1}] t_I + \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I (\tau_I)^{-1} + [\bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I (E_{0_{xyz}})^{-1} + \bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I (\tau_{xyz}^I)^{-1}], \quad (1)$$

где $E_0, E_{0_{xyz}}$ – соответственно, модули Гука при силовом воздействии на частицу при ее объемно-пространственном перемещении, H/m^2 ;

t_1 – время окачивания частицы на первой стадии, с;

η_1 – вязкость жидкой фазы, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

$\bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I, \tau_{xyz}^I$ – соответственно, нормальные и касательные напряжения, возникающие в результате механического трения между частицами в ходе их окачивания, H/m^2 ;

$\bar{\sigma}_{CV_\tau}^I$ – напряжение, воздействующее на частицу в результате механического трения, H/m^2 ;

σ_n^I, τ_1 – соответственно, предельные нормальные и касательные напряжения при сдвиговом деформировании, H/m^2 .

На второй стадии необходимо осуществить упрочнение поверхностных слоев полученных микрогранул. Это может быть обеспечено при реализации интенсивного внутреннего рециклинга микрогранул, характеризующегося несколько ограниченной траекторией их движения вдоль корпуса барабана, но интенсивным рециклингом материала. Указанный процесс может быть реализован с помощью специальных устройств, например, двухзаходных винтовых лопастей. Последние обеспечивают, при объемно-пространственной переориентации (элемент - Sv_{np2xyz})

$$\varepsilon_{II} = \frac{\bar{P}_{II}}{E_{II}} \left(1 - \exp E_1 \frac{t_2}{\eta_2} \right) + \frac{\bar{P}_{II_{ynp.cl}} - \bar{P}_{II_{мкр.зр}}}{2\tau_1} + \sigma_{Sv_{np}} (\sigma_{xyz}^{-1} + \tau_{xyz}^{-1}), \quad (2)$$

где $\bar{P}_{II_{мкр.зр.}}$, $\bar{P}_{II_{ynp.cl}}$ – соответственно, давление от силового воздействия при микрогранулировании и упрочнении поверхностного слоя микрогранул на второй стадии, H/m^2 ;

E_1, E_2 – соответственно, модули Гука при силовом воздействии на жидкую фазу при ее перемещении в порах и упрочнении микрогранулята, H/m^2 ;

t_2 – время упрочнения микрогранулята на второй стадии, с;

η_2 – вязкость жидкой фазы в порах микрогранул, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

τ – предельное напряжение при сдвиговом деформировании (текучести) микрогранул, H/m^2 ;

$\sigma_{Sv_{np}}$ – напряжение, воздействующее на слой микрогранул, при их объемно-пространственном перемещении, H/m^2 ;

σ_{xyz}, τ_{xyz} – соответственно, нормальные и касательные напряжения, возникающие при объемно-пространственном перемещении микрогранулята, H/m^2 .

На третьей стадии, реализуется окончательный процесс гранулообразования, характеризующийся совокупностью элементов: объемно-пространственного перемещения гранулята (элемент Sv_{np3xyz}), пластического деформирования гранул (элемент Сен-Венана, SV_{τ_3}), вязкого деформирования (элемент Ньютона, η_3) и элемента «Стопор» (St), определяющего процесс массообмена – параллельного разрушения менее прочных гранул и образования из их частиц микрогранулята, для образования новых гранул. Важное значение для эффективного процесса гранулообразования на третьей стадии имеет рациональное сочетание водопадно-каскадного режимов работы агрегата, обеспечивающего наибольший период соприкос-

микрогранул и частиц материала, их механический контакт и взаимодействие. Процесс представлен моделью Максвелла (элементы, Гука E_1 и Ньютона η_2), реализующей упруго-вязкое и пластическое (элемент Сен-Венана SV_{τ_2}) воздействие. Кроме того, при усилении динамического воздействия на слой микрогранулята и упрочнении их поверхностного слоя необходимо учитывать упругую деформацию, представленную элементами Гука (E_2), и объемно-пространственное перемещение частиц, в виде нелинейно-деформированного структурного элемента Sv_{np2xyz} .

Относительную деформацию микрогранулята на второй стадии можно представить в виде

новения гранулята с рабочей поверхностью, осуществляющей окатывающее воздействие на материал. При этом определяющее значение имеет организация направленного (по винтовой линии соприкосновения гранул с рабочей поверхностью) движения гранулята, характеризуемого элементом Sv_{np3xyz} .

Относительная деформация гранулята (процесс гранулообразования) на третьей стадии может быть описана выражением:

$$\varepsilon_{III} = \frac{e_{xyz} \cdot t_g \cdot (\bar{P}_{III_{maxSt}} - \bar{P}_{III_{maxynp}}) \cdot t_3}{\eta_{3ce} \cdot \sin \gamma_{maxSv_{np3}(xyz)}}, \quad (3)$$

где e_{xyz} – сдвиговая деформация при полной переориентации гранулята от действия элемента Sv_{np3xyz} ;

$\bar{P}_{III_{maxSt}}$; $\bar{P}_{III_{maxynp}}$ соответственно, максимальные значения давлений при разрушении гранул (элемент St) и их упрочнении, H/m^2 ;

t_3 – время гранулообразования на третьей стадии, с;

η_{3ce} – вязкость связующего в порах гранул, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

$\gamma_{maxSv_{np3}(xyz)}$ – предельная величина угла поперечно-продольной переориентации элемента Sv_{np3xyz} , град.

На четвертой стадии реализуется классификация полифракционного агломерата с выделением готового продукта – гранулята заданного фракционного состава. При этом, процесс классификации характеризуется упруго-вязко-пластическим деформированием слоя гранул (элементы: Гука, E_3, E_4 ; Ньютона, η_4 и Сен-Венана, SV_{τ_4}), с последующей релаксацией гранулята.

Данное сочетание элементов представляет модель Шведова.

Для интенсификации процесса классификации гранулята нами предлагается использовать его внутренний рециклинг вдоль классифицирующей поверхности, что обеспечивается принуди-

$$\varepsilon_{IV} = \varepsilon_{E_{3IV}} + (\varepsilon_{E_{4IV}} + \varepsilon_{\tau_4}) + \varepsilon_{SV_{\tau_4}} = P_{IV} \cdot E_3^{-1} + (P_{IV} \cdot E_4^{-1} + P_{IV} \cdot \eta_4 \cdot t_4) + (P_{IV} - P_{max})E_4^{-1}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{E_{3IV}}$, $\varepsilon_{E_{4IV}}$, ε_{τ_4} , $\varepsilon_{SV_{\tau_4}}$ – соответственно, относительные деформации элементов Гука (E_3, E_4), Ньютона (η_4) и Сен-Венана (SV_{τ_4});

P_{IV} – напряжение, создаваемое устройством классифицирующего действия, Н/м²;

P_{max} – предел текучести деформируемого элемента Сен-Венана, наступающий при предельных состояниях на слой гранул, Н/м²;

t_4 – период классификации сгранулированного материала, с.

Каждое из сочетаний указанных элементов обосновано предопределяет различные механизмы упруго-вязко-пластического деформирования формуемых частиц и сформованных тел

тельным силовым воздействием (представляющим элемент Гука, E_3) со стороны разнонаправленных рабочих органов.

Выражение относительной деформации гранулы на четвертой стадии имеет вид:

согласно кинетической закономерности уплотняемых шихт. Это позволяет, совместно с физическим моделированием технологических параметров, аргументировано принимать решения по выбору конструктивно-технологических параметров рабочих органов разработанного нами барабанно-винтового агрегата (БВА), схем сочетаний устройств и их установки в рабочей камере агломерирования. Проведенные нами теоретические исследования, а также физическое моделирование постайдных процессов позволили разработать патентозащищенную конструкцию для агломерирования техногенных материалов и их последующей обработки [27-28]. На рисунке 5 представлена схема патентозащищенной конструкции БВА.

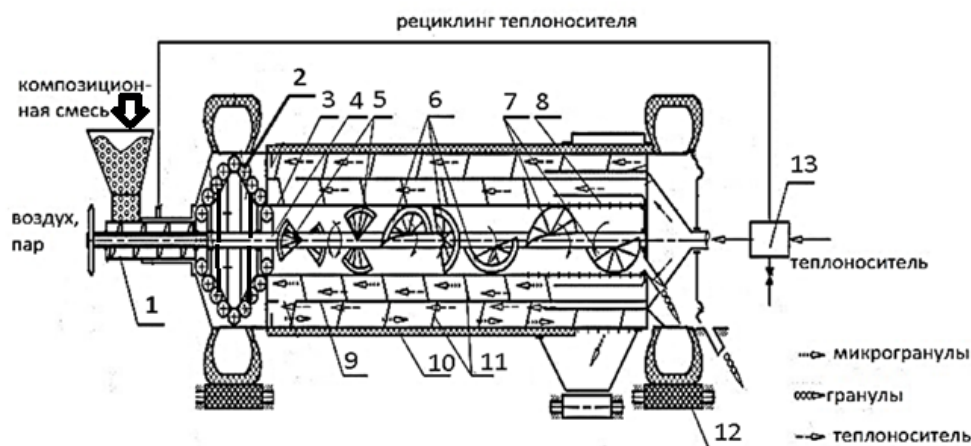


Рис. 5. Схема барабанно-винтового агрегата для агломерирования техногенных материалов
1 – приемно-загрузочное устройство; 2 – спиралевидный блок микрогранулирования; 3 – центральный барабан; 4 – центральный вал; 5 – разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти; 6 – однонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 7 – разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 8 – сетчатая поверхность; 9 – средний барабан; 10 – внешний теплоизолированный барабан; 11 – винтовые ленточные поверхности; 12 – опорные ролики; 13 – распределительный блок рециркуляции теплоносителя

Принцип работы БВА заключается в следующем: исходная композиционная смесь технического углерода со связующим поступает в приемно-загрузочное устройство 1, откуда материал подается в спиралевидный блок микрогранулирования 2. Первая стадия – полученные микрогранулы из спиралевидного блока 2, расположенного во внешнем теплоизолированном барабане 10, поступают в центральный барабан 3. В последнем, с помощью расположенных на валу 4 рабочих органов различного геометрического профиля микрогранулы проходят дальнейшие

стадии обработки. Вторая стадия – упрочнения микрогранулята разнонаправленными двухзаходными винтовыми лопастями 5. Третья стадия – последующее агломерирование микрогранул однонаправленными однозаходными винтовыми лопастями 6. Четвертая стадия – классификация полученного полифракционного гранулята разнонаправленными однозаходными винтовыми лопастями 7 через сетчатую поверхность 8. Отклассифицированные гранулы подвергаются сушке, перемещаясь вдоль оси среднего 9 и внешнего теплоизолированного барабана 10 при

помощи винтовых ленточных поверхностей 11. Внешний теплоизолированный барабан 10 упругими торообразными поверхностями (бандажами) опирается на прорезиненные опорные ролики 12. Конструкция агрегата предусматривает рециркуляцию теплоносителя через распределительный блок 13.

Разработанный нами агрегат позволяет в полном объеме реализовать все требуемые технологические операции, необходимые для получения качественных гранул, соответствующих требованиям потребителя: предварительное микрогранулирование, упрочнение поверхностного слоя микрогранул, объемно-пространственное агломерирование, классификация гранул полифракционного состава. Кроме того, готовый агломерированный материал подвергается тепловой обработке (сушке) в БВА комбинированного действия с замкнутым циклом движения теплоносителя.

Проведенные нами теоретические исследования механо-реологической модели постадийного агломерирования полидисперсных материалов позволили установить основополагающие

принципы организации технологических процессов гранулообразования на каждой из четырех стадий обработки материала и классификации гранулята. Обоснована необходимость использования различных элементов (Гука, Ньютона, Сен-Венана, элемента объемно-пространственной ориентации частиц и гранулята Sv_{np} , элемента стопор St), а также их сочетаний (модель Максвелла, Бингмана, Шведова и др.) на каждой из стадий.

Полученные расчетные зависимости и общая математическая модель процесса агломерирования таких специфических техногенных материалов, как технический углерод, с учетом основополагающих принципов физико-химической механики, подтверждают обоснованность теоретико-экспериментального подхода (моделирования) при разработке специального агломерирующего оборудования. Разработанное оборудование позволяет получать качественные гранулы, требуемого гранулометрического состава, представленные на рисунке 6.

Физико-механические характеристики получаемого гранулята, а также его гранулометрический состав представлены в таблице 5.

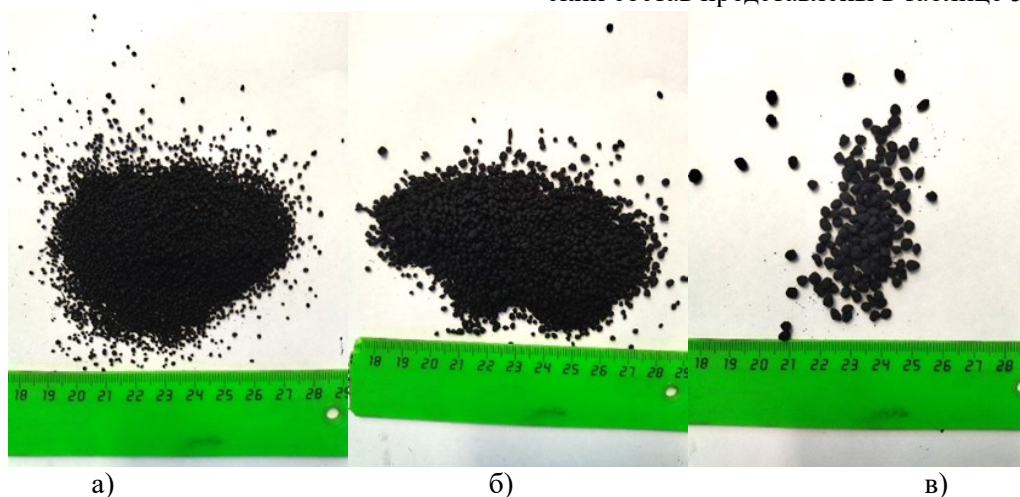


Рис. 6. Гранулы ТУ, полученные при переработке органических ТКО:
а) гранулы размером 2–3 мм; б) гранулы размером 3–4 мм; в) гранулы размером 4–5 мм

Таблица 5

Физико-механические характеристики и гранулометрический состав получаемого гранулята

Наименование параметра	Значение
Содержание связующего, масс. частей	20–22 %
Гранулометрический состав:	
≥5мм	8–9 %
4–5 мм	4–5 %
3–4 мм	5–6 %
2–3 мм	65–70 %
≤2 мм	18–20 %
Плотность насыпная фракций 2–4 мм	600–700 кг/м ³
Сорбционная емкость по метиленовому голубому	92–98 %
Маслоемкость	8–11 кг/кг

Разработанное учеными БГТУ им. В.Г. Шухова – научный руководитель д.т.н., проф. В.С. Севостьянов, патентозащищенное оборудование

и технические средства, в настоящее время проходят опытно-промышленные технологические испытания и внедрение на производственной

площадке индустриального партнера ООО «ТК «Экотранс» г. Белгород – директор Н.Т. Шеин, руководитель научно-производственного объ-

единения В.В. Оболонский. На рисунке 7 представлена технологическая линия низкотемпературного термолиза органических ТКО.



Рис. 7. Опытно-промышленная установка низкотемпературного термолиза, расположенная на ООО «ТК «Экотранс». Производительность Q – 500 кг/ч

На рисунке 8 представлен барабанно-винтовой агрегат для агломерирования полидисперсных техногенных материалов, входящий в состав

технологической линии низкотемпературного термолиза.



Рис. 8. Барабанно-винтовой агрегат для агломерирования полидисперсных материалов. Производительность Q – 200–300 кг/ч

Получаемый в БВА гранулят может быть использован в следующих областях промышленности:

- при производстве резинотехнических изделий в качестве наполнителя. Размер гранул – 1÷2мм.;
- при производстве полимерных труб в качестве красителя. Размер гранул – 2÷3 мм;
- в качестве адсорбента для очистки жидких сред. Размер гранул – 2÷4 мм.

Кроме того, гранулят используется в других востребованных технологиях.

Выводы. Реализация вышеуказанных инновационных технологий базируется на выполненных научно-технических разработках:

1. Механо-реологической модели процесса агломерирования полидисперсных материалов, а

также уравнениях деформационного воздействия рабочих органов на обрабатываемый материал.

2. Патентозащищенных конструкциях: термолизных технологиях и специальных технических решениях, а также БВА для агломерирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью. Последний обеспечивает получение технического углерода низкотемпературной термолизной технологии в агломерированном состоянии.

3. Разработанной опытно-промышленной установки БВА производительностью 200–300 кг/ч.

4. Полученной агломерированной продукции (технического углерода 2–4 мм) и регламентированного состава композиционной смеси (в

виде связующего, фракционных соотношений ТУ и др.).

5. Технологическом регламенте на процесс постадийного агломерирования ТУ в патентозащищенной конструкции БВА.

Источник финансирования: Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта “Наука и университеты” новой лабораторией под руководством молодых исследователей “Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы” (FZWN-2021-0014).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Народонаселение по данным ООН [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/population> (дата обращения: 24.07.2023).
2. Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб./Росстат. –0-92 М., 2022. 115 с.
3. Мочалова Л.А., Соколова О.Г., Полежаева М.В., Гриненко Д.А. Институциональные условия решения проблем в сфере обращения с отходами производства и потребления // Управление техносферой. 2020. Т. 3. Вып. 2. С. 159-179. DOI: 10.34828/UdSU.2020.85.39.001.
4. Пат. 110745, Российская Федерация, МПК C08J 11/00. Установка для переработки резиносодержащих отходов // Бочавер К.З.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП Термолиз» заявл. 19.04.2011; опубл. 27.11.2011, бюл. №33. 2 с.
5. Bochaver K. Spiral reactors in heterogeneous technological processes: Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 200 с.
6. Кирейчиков И.В., Унжаков В.В., Маслов Д.И. Органика на полигоне: вредное воздействие и как его избежать // Журнал ТБО – обращение с отходами 2021. Вып. 6 (179). С. 28-33.
7. Хафизов И.Ф., Мусин Р.Р. Современные тенденции развития процесса пиролиза // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 231–234.
8. Разноушкин А.Е., Хайбуллин А.А., Жирнов Б.С., Разноушкин А.Е., Когот Ю.Е., Нуриева С.А. Исследование термолиза нефтяных пеков из различного сырья // Кокс и химия. 2019. № 1. С. 34–38.
9. Гунич С.В., Дьячкова С.Г., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Состав углеродного остатка при утилизации несортированных твердых бытовых отходов методом СВЧ-термолиза // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 9. С. 572–575.
10. Glagolev S., Shein N., Sevostianov V., Obolonsky V., Shamgulov R. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste // Ecology and Industry of Russia. 2020. №24. Pp. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15
11. Sevostianov V.S., Shein N.T., Shamgulov R.U., Obolonsky V.V. Thermolysis technology and technical means for processing organic technogenic materials // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Т.173. Pp. 329–335. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_42
12. Пат. №2528670, Российская Федерация, Способ и устройство для гранулирования в псевдооживленном слое: МПК B01J/ Федерико Зарди (CH); заявитель и патентообладатель УРЕ КАСАЛЕ С.А. (CH). № 2010132281/05; заявл. 19.12.2008; опубл. 20.12.2014, Бюл. №26. 19 с.
13. Пат. №2152247, Российская Федерация, Способ гранулирования мелкодисперсных материалов: МПК B01J/ В.Г. Островский, С.П. Шеремет, О.Н. Иванов; заявитель и патентообладатель Государственное предприятие РФ Центральное научно-исследовательское бюро. № 99106728/12; заявл. 31.03.1999; опубл. 10.07.2000, Бюл. №19. 3 с.
14. Пат. №2714473, Российская Федерация, Способ гранулирования мелкодисперсных материалов: МПК B01J/ А.С. Сахарова, Е.Г. Еремеев, М.В. Шершнева и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. № 2019121445; заявл. 05.07.2019; опубл. 17.02.2020, Бюл. №5. 1с.
15. Пат. №2394638, Российская Федерация, Устройство для обработки порошкообразного материала: МПК B01J/ ХЮТТЛИН Бергер (DE); заявитель и патентообладатель ХЮТТЛИН Бергер (DE)/ № 2007113015/15; заявл. 10.09.2004; опубл. 20.07.2010, Бюл. №20. 12с.
16. Пат. №2558893, Российская Федерация, Гранулятор: МПК B01J/ И.Ф. Шлегель; заявитель и патентообладатель И.Ф. Шлегель/ № 204119097; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. №22. 8 с.
17. Пат. №2643046, Российская Федерация, Устройство для гранулирования: МПК B01J/ М.Я. Рыскин, Б.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель М.Я. Рыскин, Б.А. Яковлев/ № 2017110627; заявл. 29.03.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. №4. 1 с.
18. Pat. № ES2379075T3, Spain, Process and apparatus for continuous wet granulation of powder material: Classifications B01J2/20, B29B 7/48 / REMON, Jean-Paul, VERVAET Chris, KELEB Eseldin y VERMEIRE, An; Priority to PCT/EP2003/013327, 26.11.2002 US 429214 P. Publication 20.04.2012.

19. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов. М.: ВНИИЭСМ, 1994. 297 с.

20. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография // Белгород. Изд-во БГТУ. 2009. 228 с.

21. Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р., Шомин И.П. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений // Москва. Машиностроение. 1984. 192 с.

22. Севостьянов М.В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов: монография // Белгород. Изд-во БГТУ. 2017. 204 с.

23. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Ядыкина В.В. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2013. №6. С. 102–106.

24. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 400 с.

25. Ничипоренко С.П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии

строительной керамики. Киев.: Наукова думка, 1968. – 76с.

26. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учебное пособие для строительных вузов. М.: Высш. школа, 1978. 447с.

27. Пат. №2748629, Российская Федерация, Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки: МПК F26B / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов, Д.Н. Перелыгин, В.В. Оболюнский; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»/ №2020129204; заявл. 03.09.2020; опубл. 28.05.2021, Бюл. №16. 8 с.

28. Пат. №040258, Евразийский, Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки: МПК F26B / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов, Д.Н. Перелыгин, В.В. Оболюнский; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»/ опубл. 13.05.2022.

Информация об авторах

Шамгулов Роман Юрьевич, аспирант кафедры технологические комплексы машины и механизмы. E-mail: shamguloff@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.10.2023 г.

© Шамгулов Р.Ю., 2023

Shamgulov R. Yu.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

DEVELOPMENT, RESEARCH AND PILOT INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF CARBON BLACK AGGLOMERATION TECHNOLOGY

Abstract. The article examines the issues of agglomeration of polydisperse technogenic materials with low bulk density, in particular carbon black (CB). Patent-protected technical solutions and technology for processing organic solid technogenic materials obtained by processing MSW by low-temperature thermolysis ($T \leq 500$ °C) are presented. Distinctive features of the developed technical means are: sealing loading and unloading units without access to air oxygen, geometric profile and configuration of internal working parts, a system for aspiration and condensation of a vapor-gas mixture, etc. A patent-protected design of a drum-screw unit for agglomeration of technical specifications of low-temperature thermolysis technology has been presented. Specification studies have been carried out, obtained by processing organic solid municipal waste using low-temperature thermolysis. A mechano-rheological model of the agglomeration process of the material under study has been developed. Theoretical studies of the mechano-rheological model of stage-by-stage agglomeration of polydisperse materials have been carried out. The fundamental principles of organizing technological processes of granule formation at each stage of material processing and granulate classification have been established. The necessity of using elements (Hooke, Newton, Saint-Venant, etc.) and mechano-rheological models of volumetric-spatial orientation of CB particles and agglomerated granulate constructed on their basis at various stages is substantiated. The combination of elements used in the models of Maxwell, Bingman, Shvedov, etc., at each stage of the agglomeration process is theoretically justified. On the basis of

theoretical studies and modeling of stage-by-stage agglomeration processes, special devices have been developed, implemented in the patent-protected design of a combined-action drum-screw unit (DSU CA). Design documentation has been developed and a pilot industrial sample of BVA CD has been manufactured for agglomeration of technogenic polydisperse materials.

Keywords: Low-temperature thermolysis, agglomeration, carbon black, drum-screw unit, mechano-rheological model.

REFERENCES

1. Population according to the UN [Narodonaselenie po dannym OON]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/population> (date of treatment: 24.07.2023).
2. Environmental protection in Russia [Ohrana okruzhayushchej sredy v Rossii]. 2022: St. col./Rosstat. –0-92 M., 2022. 115 p. (rus)
3. Mochalova L.A., Socolova O.G., Polezhaeva M.V., Grinenko D.A. Institutional conditions for solving problems in the field of industrial and consumer waste management [Institucional'nye usloviya resheniya problem v sfere obrashcheniya s othodami proizvodstva i potrebleniya]. Technosphere management. 2020. Vol. 3. Rel. 2. Pp. 159–179. DOI: 10.34828/Udsu.2020.85.39.001.(rus)
4. Bochaver K.Z. Installation for processing rubber waste. Patent RF, no. 2011115344/05, 2011
5. Bochaver K. Spiral reactors in heterogeneous technological processes: Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 200 p. (rus)
6. Kirejchikov I.V., Unzhakov V.V., Maslov D.I. Organics at the landfill: harmful effects and how to avoid them [Organika na poligone: vrednoe vozdejstvie i kak ego izbezhat']. Solid waste log - waste management 2021. Vol. 6 (179). Pp. 28–33. (rus)
7. Xafizov I.F., Musin R.R. Current trends in the development of the pyrolysis process [Sovremennye tendencii razvitiya processa piroliza]. Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18. No. 2. Pp. 231–234. (rus)
8. Raznoushkin A.E., Xajbullin A.A., Zhirnov B.S., Raznoushkin A.E., Kogot Yu.E., Nurieva S.A. Study of the thermolysis of petroleum pitches from various raw materials [Issledovanie termoliza neftyanyh pekov iz razlichnogo syr'ya]. Coke and chemistry. 2019. No. 1. Pp. 34–38. (rus)
9. Gunich S.V., D'yachkova S.G., Yanchukovskaya E.V., Dneprovskaya N.I. Composition of the carbon residue during the disposal of unsorted municipal solid waste by microwave thermolysis [Sostav uglerodnogo ostatka pri utilizacii nesortirovannyh tverdyh bytovykh othodov metodom SVCH-termoliza]. Chemical Technology. 2014. Vol. 15. No. 9. Pp. 572–575. (rus)
10. Glagolev S., Shein N., Sevostianov V., Obolonsky V., Shamgulov R. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste. Ecology and Industry of Russia. 2020. No. 24. Pp. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15 (rus)
11. Sevostianov V.S., Shein N.T., Shamgulov R.U., Obolonsky V.V. Thermolysis technology and technical means for processing organic technogenic materials. Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Vol. 173. Pp. 329–335. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_42
12. Federico Zardi. Method and device for fluidized bed granulation. Patent RF no. 2010132281/05, 2008.
13. Ostrovskij V.G., Sheremet S.P., Ivanov O.N. Method of granulating fine materials. Patent RF no. 99106728/12. 1999.
14. Saharova A.S., Eremeev E.G., Shershneva M.V. and etc. Method of granulating fine materials. Patent RF no. 2019121445, 2019.
15. Hyuttlin Bergert Device for processing powdery material. Patent RF no. 2007113015/15, 2004.
16. Shlegel' I.F. Granulator. Patent RF no. 204119097/05, 2014.
17. Ryskin M.Ya., Yakovlev B.A. Granulation device. Patent RF no. 2017110627, 2017.
18. Process and apparatus for continuous wet granulation of powder material: Pat. no. ES2379075T3 Spain, Classifications B01J2/20, B29B 7/48 / REMON, Jean-Paul, VERVAET Chris, KELEB Eseldin y VERMEIRE, An; Priority to PCT/EP2003/013327, 26.11.2002 US 429214 P. Publication 20.04.2012.
19. Sulimenko L.M., Al'bac B.S. Sintering processes in the production of building materials [Agglomeracionnye processy v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. M.: VNIIESM, 1994. 297 p. (rus)
20. Il'ina T.N. Agglomeration processes in technologies for processing dispersed materials [Processy aglomeracii v tekhnologiyah pererabotki dispersnyh materialov]: a monograph // Belgorod: publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 228 p.(rus)
21. Generalov M.B., Klassen P.V., Stepanova A.R., Shomin I.P. Calculation of equipment for granulating mineral fertilizers [Raschet oborudovaniya dlya granulirovaniya mineral'nyh udobrenij]. Moscow: Mechanical engineering, 1984. 192 p.(rus)
22. Sevost'yanov M.V. Calculation and design of equipment for compacting technogenic materials: a monograph [Raschet i proektirovanie oborudovaniya dlya kompaktirovaniya tekhnogennyh materialov: monografiya]. Belgorod: publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017. 204 p.(rus)

23. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Gridchin A.M., Ural'skij V.I., Sevost'yanov M.V., Yady'kina V.V. Resource-energy-saving modules for comprehensive recycling of man-made materials [Resurso-energoberegayushchie moduli dlya kompleksnoj utilizacii tekhnogennyh materialov] // BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 6. Pp. 102–106. (rus)

24. Rebinder P.A. Physico-chemical mechanics of dispersed structures [Fiziko-himicheskaya mekhanika dispersnyh struktur]. M.: The science, 1966. 400 p.(rus)

25. Nichiporenko S.P. Physico-chemical mechanics of dispersed structures in the technology of building ceramics [Fiziko-himicheskaya mekhanika

dispersnyh struktur v tekhnologii stroitel'noj keramiki]. Kyiv.: Naukova Duma, 1968. 76 p. (rus)

26. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics [Rheological foundations of soil mechanics]: Textbook for construction universities. M.: Higher school, 1978. 447 p.(rus)

27. Sevost'yanov V.S., Shein N.T., Sevost'yanov M.V., Shamgulov R.U., Pereligin D.N., Obolonsky V.V. Drum-screw unit for granulating man-made materials and their processing. Patent RF no. 2020129204, 2020.

28. Drum-screw unit for granulating man-made materials and their processing. Pat. no 040258 Eurasian.

Information about the authors

Shamgulov, Roman Yu. Postgraduate student. E-mail: olga.koalchenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 05.10.2023

Для цитирования:

Шамгулов Р.Ю. Разработка, исследования и опытно-промышленное освоение технологии агломерирования технического углерода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 124–137. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137

For citation:

Shamgulov R.Yu. Development, research and pilot industrial development of carbon black agglomeration technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 124–137. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье представлен инженерный анализ роботизированной ячейки. Рассматриваются определения CAD/CAM/CAE-системы. Представлены основные разработчики специализированного программного обеспечения для инженерного анализа, к которым относятся: Siemens PLM Software; ANSYS; Научно-технический центр «АПМ»; ТЕСИС; NUMECA. В современное время, конструкции и изделия эволюционировали с рекордным темпом, а это говорит о том, что их состав стал наиболее сложным и более эффективным. Инженерный анализ роботизированной ячейки выполняется в консолидированной платформе Simcenter 3D. Представленная платформа включает в себя огромный список CAE-приложений, с помощью которых есть возможность соответствовать современным требованиям, предъявляемым проектированию и совершенствованию изделий. Основными отраслями, которые используют программное обеспечение для структурного анализа, являются аэрокосмическая промышленность, машиностроение, медицина, робототехника и другие. В работе, описаны основные этапы инженерного анализа и что он под собой подразумевает. Вовремя подготовки к расчету была создана расчетная схема и были определены эксплуатационные нагрузки. Также назначен материал на основные элементы конструкции и направляющие с каретками. В конце инженерного анализа произведены расчеты коэффициентов прочности и жесткости. Сделаны обобщающие выводы, что расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

Ключевые слова: CAE, компьютерный дизайн, инженерный анализ, роботизированные ячейки, нагрузки, ограничения, Simcenter 3D, CAD/CAM/CAE-система.

Введение. В настоящее время из-за современных технологий, производство стало основываться на устоявшемся электронном дизайне, который позволяет ускорить процесс разработки нового и качественного изделия при этом снизить стоимость его изготовления. За счет компьютерного моделирования можно выбрать оптимальный дизайн изделия и уменьшить количество испытаний, заменив их тестированием виртуальной модели [1–5]. На сегодняшний день актуальной проблемой в разработке роботизированных ячеек необходимо специализированное программное обеспечение (ПО) для создания CAD-моделей (CAD – Computer Aided Design – система автоматизированного проектирования) всех узлов. Затем необходимо произвести численный анализ (CAE – Computer-Aided Engineering) полученной конструкции. В основном всегда CAD и CAE системы используются совместно, как взаимно дополняющие друг друга на различных этапах создания дизайна изделия [6–8].

Для инженерного анализа в роботизированной области применяют специализированное программное обеспечение, которое позволяет определить прочностные характеристики изделия. Главными разработчиками программного обеспечения для инженерного анализа, являются: Siemens PLM Software; ANSYS; Научно-

технический центр «АПМ»; ТЕСИС; NUMECA [6–8].

Сфера разработки конструкций и изделий за небольшой период эволюционировала с рекордным темпом. Конструкция большинства изделий стали более сложными. Они включают в себя не только механические компоненты, но и электронику, программное обеспечение (ПО) и различные датчики [9].

Большая часть компаний сталкивается с проблемами в инженерных отделах. Основная часть проблем начинается в области прочностных расчетов, так как растет сложность изделия и растут требования к безопасности и сертификации.

Комплексный подход подразумевает под собой плотное сотрудничество инженерных команд на всех этапах от создания CAD-моделей до подготовки CAE-моделей и осуществления расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС).

Также для определения наибольшей точности конструкции, необходимо подобрать материал и размер деталей в соответствии с требованиями к сертификации и провести огромное количество расчетов [10–12].

Методика. В современном мире мировым лидером в области CAD/CAM/CAE-систем считается компания Siemens. Для совершенствования практики создания изделия они разработали консолидированную платформу Simcenter 3D.

Он способствует эффективной работе со сборкой изделия, которая содержит различные компоненты. Simcenter 3D - это открытая среда, которая способна подключаться к внешним источникам данных и решателям, что позволяет ей интегрироваться в любой процесс разработки. Данная платформа включает в себя огромное количество CAE-приложений, которые позволяют соответствовать современным требованиям проектирования и совершенствования изделий, также при помощи нее можно решить такие проблемы, как [6, 7]:

- отсутствие интеграции и прозрачности рабочего процесса;
- недостаток необходимых знаний, которые препятствуют коллаборации;
- трата огромного количества времени для перестройки CAE-модели для каждого изделия из сборки;
- достаточно высокая стоимость лицензирования, которая образуется из-за применения множества других инструментов.

При выполнении инженерного анализа в данной работе используется CAD/CAM/CAE-система NX [6, 7].

При проектировании оборудования необходимо произвести статический анализ конструкции на прочность и жесткость, так как основной задачей является убедиться в надёжности изделия. В данном расчете рассматривается конструкция гибкой производственной платформы

роботизированной системы. Установка представляет собой стойку, состоящую из тележки и опоры, приваренную к ней, соединённую с колонной при помощи болтового соединения, на которой находится тележка с роботом KUKA. Первоначально необходимо определить эксплуатационные нагрузки, действующие на данную конструкцию [13–15].

Эксплуатационные нагрузки – это комплекс нагрузок, которым подвергается материал, изделие или конструкция в процессе эксплуатации.

1. На платформу действует сила, происходящая от собственного веса – сила тяжести, вектор которой направлен строго вниз, и прикладывается к центру масс конструкции. Значение данной силы определяется с помощью инструмента «Измерение» CAD/CAM/CAE – системы NX. Для более точного определения значения, при создании ЭЦМ были заданы материалы на все детали. Исходя из рисунка 1, значение веса конструкции приблизительно равно 8244 Н.

2. Вес робота KUKA также является эксплуатационной нагрузкой. KUKA KR 16 R2010 – это 6-осевой робот (робот-манипулятор), работающий с нагрузкой до 16 кг на дистанции до 2013 мм. Повторяемость KUKA KR 16 R2010 составляет 0,04 мм, а масса робота равна 255 кг. Соответственно значение веса робота с навесным оборудованием приблизительно равно 2600 Н. Вектор силы прикладывается к центру масс робота KUKA и направлен строго вниз.

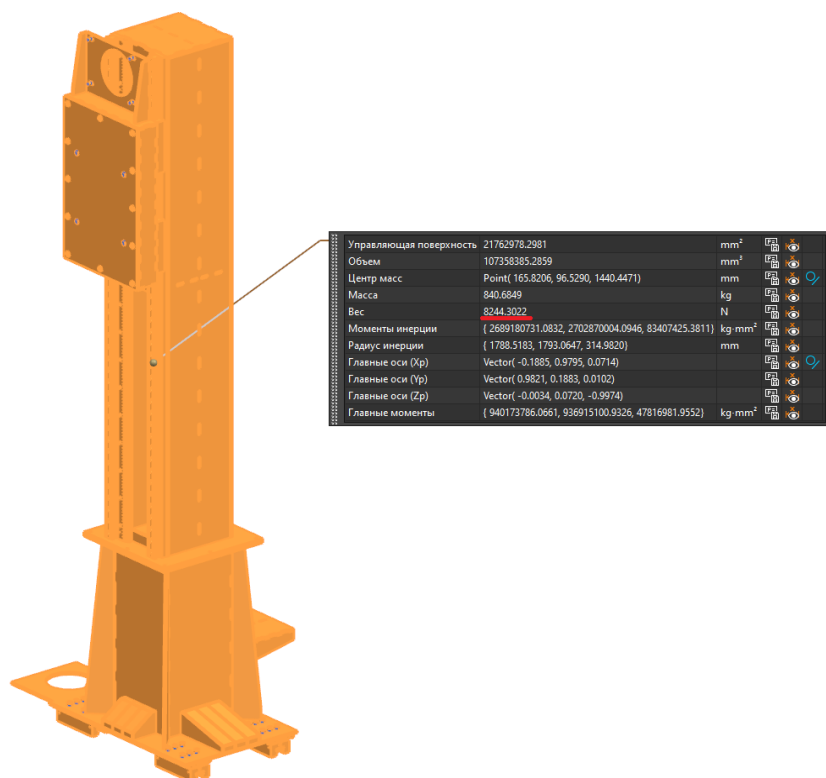


Рис. 1. Вес роботизированной ячейки

3. На тележку стойки и тележку робота действует такая эксплуатационная сила, как вес мотор-редуктора. Мотор-редуктор GUDEL HPG используются в машиностроении, технологии обработки и различных технологических процессов, и характеризуется высоким качеством, длительным сроком службы и минимальными требованиями к обслуживанию. Сила, происходящая от веса принятой модели (HPG120-C1-60), согласно паспорту, равна 500Н, вектор которой направлен строго вниз.

4. Вес блока, системы противовеса и катушки с проволокой также являются эксплуатационными нагрузками и рассчитываются в соответствии со своими массами. Блок расположен на верхнем листе конструкции стойки и его вес распределённо «давит» на всю площадь грани. Система противовеса крепится с помощью болтового соединения к задней грани стойки. Сила, происходящая от веса катушки с проволокой, равномерно распределяется по подставке, пред-

назначенной для неё. Значение веса блока, системы противовеса и катушки: 300Н, 2300Н и 3000Н соответственно.

5. Также при движении тележки стойки или тележки робота возникает сила от мгновенного ускорения робота KUKA, которую можно рассчитать по формуле:

$$F = m \cdot a; \quad (1)$$

где m – масса конструкции роботизированной ячейки, кг;

a – ускорение, действующее на конструкцию, м/с.

Соответственно:

$$F = 260 \cdot 1 = 260 \text{ Н.}$$

Вектор действия силы прикладывается к центру масс робота KUKA, и противоположно направлен к вектору ускорения элемента конструкции роботизированной ячейки.

Наименование, обозначение и значение всех эксплуатационных нагрузок, действующих на конструкцию роботизированной ячейки, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эксплуатационные нагрузки

№	Наименование	Обозначение	Значение, Н
1	Собственный вес конструкции	F1	8244
2	Вес робота KUKA	F2	2600
3	Вес мотор-редуктора	F3	500
4	Вес блока	F4	300
5	Вес системы противовеса	F5	2300
6	Вес катушки с проволокой	F6	3000
7	Сила от мгновенного ускорения*	F7	260

* – вектор силы инерции принимает направление в соответствии с направлением движения тумбы и тележки робота, которая зависит от рассматриваемого случая.

Основная часть. После определения эксплуатационных нагрузок начинается следующий этап структурного анализа является разработка расчётной схемы роботизированной ячейки.

Расчётная схема – это упрощённая, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности объекта, определяющие его поведение под нагрузкой.

На рисунке 2 представлена расчётная схема роботизированной ячейки, из которой видно:

1. Конструкция ячейки жестко закреплена нижней частью кареток, а именно поверхностями соприкасаемые с направляющими.

2. С помощью функционала CAD/CAM/CAE – системы NX были определены центры масс робота KUKA и системы противовеса, и к ним, соответственно, заданы силы, такие как вес робота KUKA, вес системы противовеса и сила от мгновенного ускорения робота.

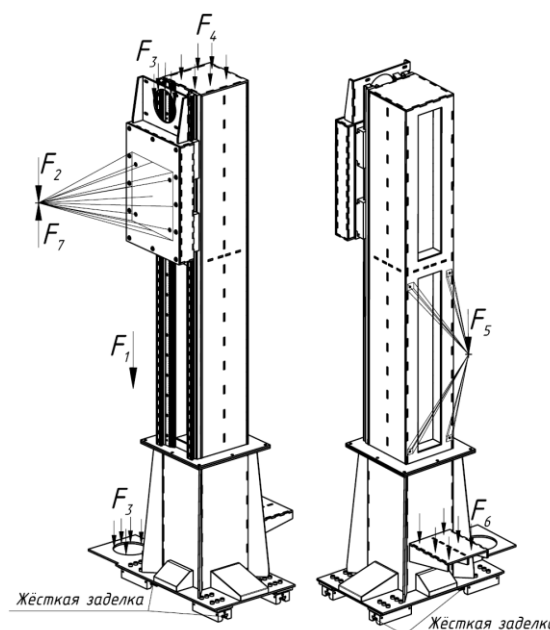


Рис. 2. Расчётная схема

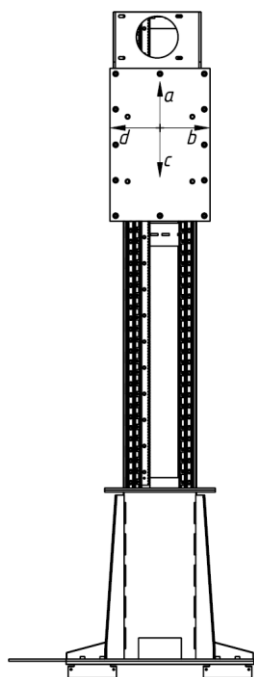


Рис. 3. Направление векторов силы от мгновенного ускорения элементов.

3. Также был определён центр масс всей конструкции, и задан вес роботизированной ячейки.

4. Вес мотор-редуктора задаётся распределённой силой к посадочным поверхностям тележки робота и тележки стойки, вектор которой направлен строго вниз.

Также в ходе расчета необходимо рассмотреть несколько случаев нагружения конструкции роботизированной ячейки, которые зависят от направления движения тележки робота и тележки стойки. В данном случае выбраны:

- для тележки робота направления вверх и вниз;
- для тележки стойки направления влево и вправо.

Вектор силы от мгновенного ускорения робота KUKA направлен противоположно направлению движения элементов конструкции, соответственно рассмотрим следующие случаи нагружения (рис. 3):

- 1) конструкция находится в неподвижном состоянии, сила не действует;
- 2) тележка робота движется вниз, вектор силы сонаправлен с вектором $\vec{a}$;
- 3) тележка робота движется вверх, вектор силы сонаправлен с вектором $\vec{c}$;
- 4) тележка стойки движется влево, вектор силы сонаправлен с вектором $\vec{b}$;
- 5) тележка робота движется вниз, вектор силы сонаправлен с вектором $\vec{d}$;

Таким образом, было определено 5 основных расчетных случаев нагружения роботизированной ячейки с целью наиболее точного определения прочностных показателей конструкции.

Следующим этапом структурного анализа является разработка конечно-элементной сборки с помощью функционала приложения «Пре/пост-процессор» в CAD/CAM/CAE – системе NX.

Адекватность расчета во многом зависит от назначенных материалов, так как физико-механические свойства напрямую влияют на результаты анализа. Соответственно, первым этапом является назначение материалов на детали конструкции (рис. 4).

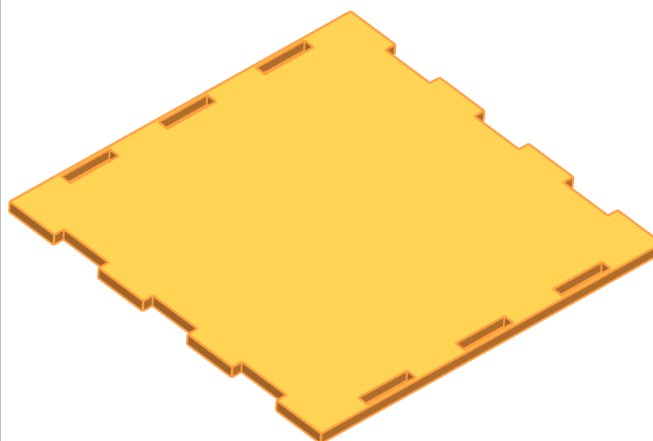
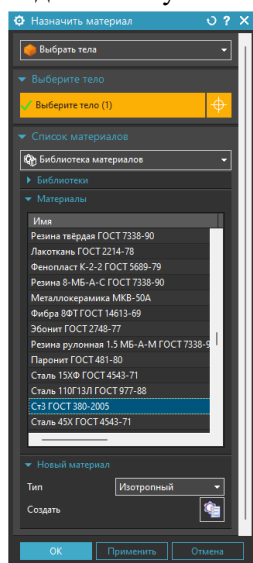


Рис. 4. Назначение материала

Все основные несущие элементы роботизированной ячейки изготавливаются из Ст3, но такие детали, как направляющая и каретка изготавливаются из антикоррозийной нержавеющей

стали – AISI 304 (08X18H10T). В таблице 2 приведены основные физико-механические свойства стали Ст3.

Таблица 2
Физико-механические свойства стали Ст3

Наименование параметра	Значение параметра
Массовая плотность, кг/м ³	7800
Модуль Юнга, МПа	200000
Коэффициент Пуассона	0,27
Предел текучести, МПа	390
Предел прочности на растяжение, МПа	530

Следующим этапом разработки является идеализация (упрощение) геометрии деталей конструкции. Она необходима для того, чтобы исключить маловлияющие на процесс расчёта конструктивные элементы деталей в пользу сокращения времени анализа.

После назначения материала и идеализации геометрии необходимо создать таблицу физических свойств и коллектор сеток (рис. 5). Коллектор сеток содержит информацию о физических свойствах, параметрах отображения сетки, и назначает соответствие типа конечного элемента таблице физических свойств (рис. 6).

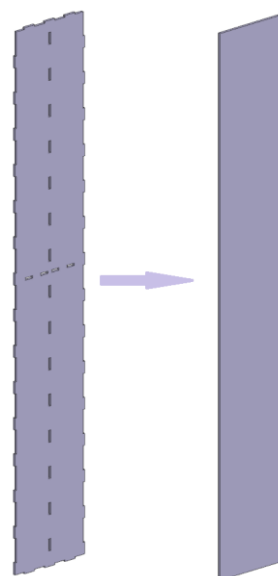


Рис. 5. Идеализация геометрии

Следующим этапом необходимо задать конечно-элементную сетку. В данном анализе в большинстве случаев была выбрана 3D гексаэдральная сетка, так как детали имеют «простую» геометрию (рис. 7).

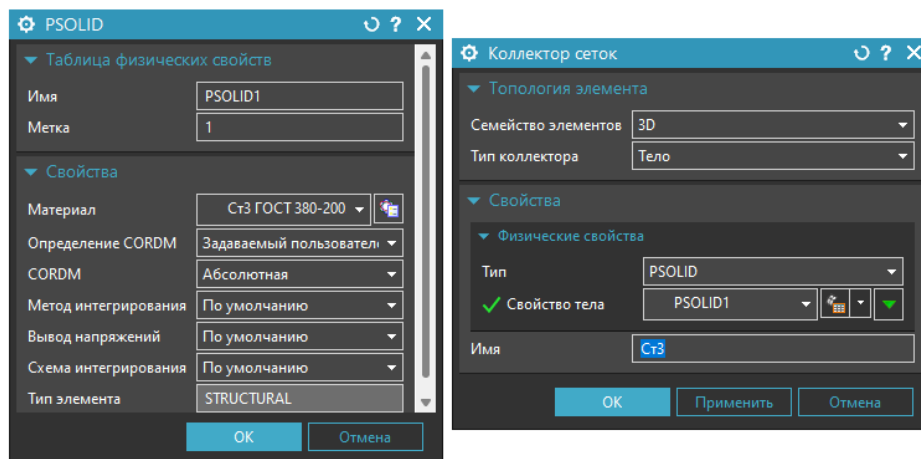


Рис. 6. Создание таблицы физических свойств и коллектора сеток

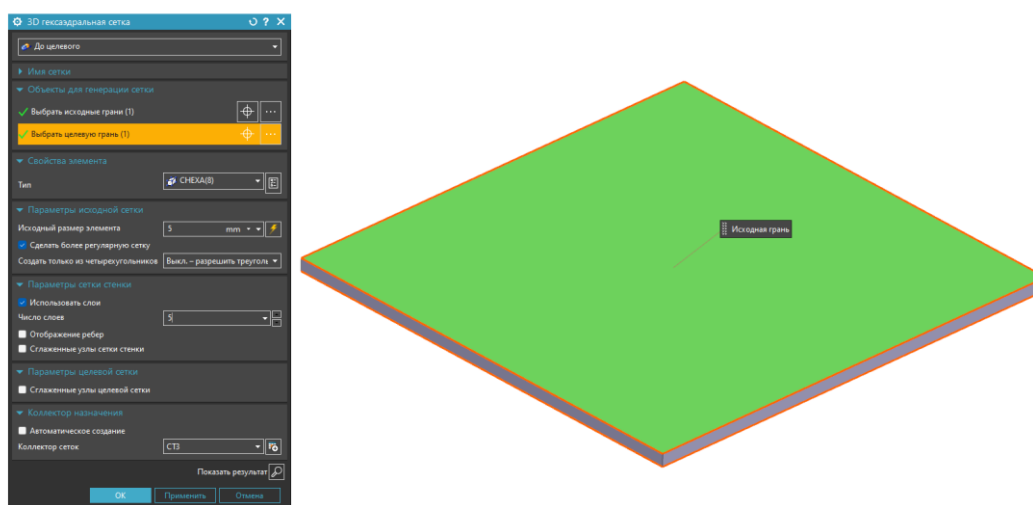


Рис. 7. Создание конечно-элементной сетки

Аналогичным образом создаются КЭ модели остальных компонентов сборки.

Затем создается конечно-элементная сборка, в которую добавляются созданные ранее КЭ модели (рис. 8).

Важным этапом разработки данной конечно-элементной сборки является создание универсального соединения «Сосредоточенная масса» (рис. 9) и 1D соединения между центром масс робота KUKA и гранью тележки робота (рис. 10). Также 1D соединение было задано между центром масс системы противовеса и стойкой.

Когда КЭ-сборка готова, создается набор данных расчетной модели. При создании расчетной модели основными шагами является задание условий контактного взаимодействия между компонентами, ограничений и нагрузок.

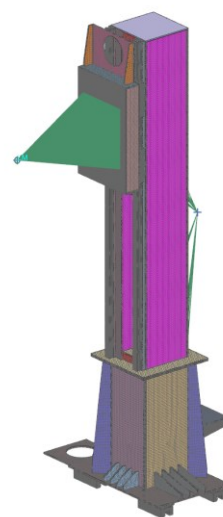


Рис. 8. Конечно-элементная сборка роботизированной ячейки

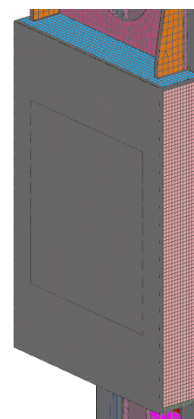
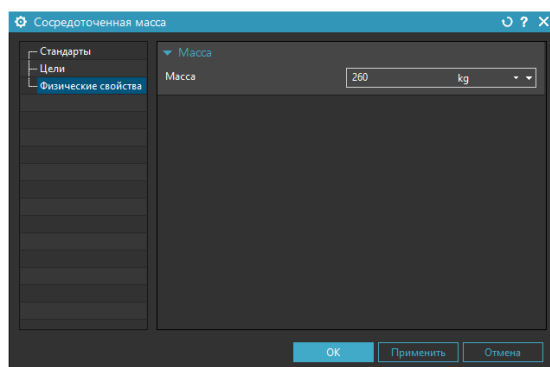


Рис. 9. Универсальное соединение «Сосредоточенная масса»

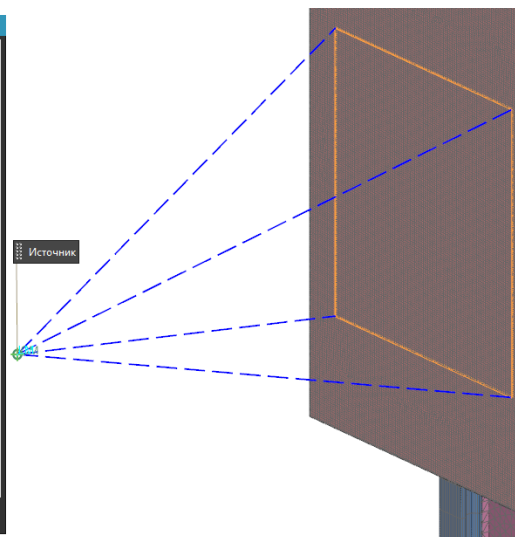
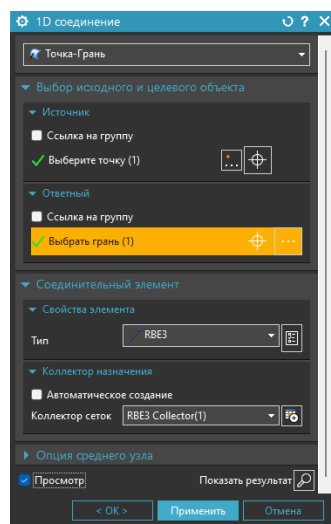


Рис. 10. 1D соединение

При задании условий контактного взаимодействия между компонентами используется команда «Склеивание поверхности с поверхностью» и «Контакт поверхности с поверхностью» (рис. 11). Склеивание позволяет моделировать поведение конструкции с условием соединения

компонентов между собой за счет сварки. Контакт поверхностей позволяет моделировать поведение конструкции за счет передачи нагрузки от одного тела к другому через контактирующие поверхности, с учетом сил трения (рис. 12).

Затем задаются ограничения, ограничивающие количество степеней свободы сборки. В данном решении с помощью команды «Заделка»

ограничиваются грани кареток, касающиеся направляющих (рис. 13).

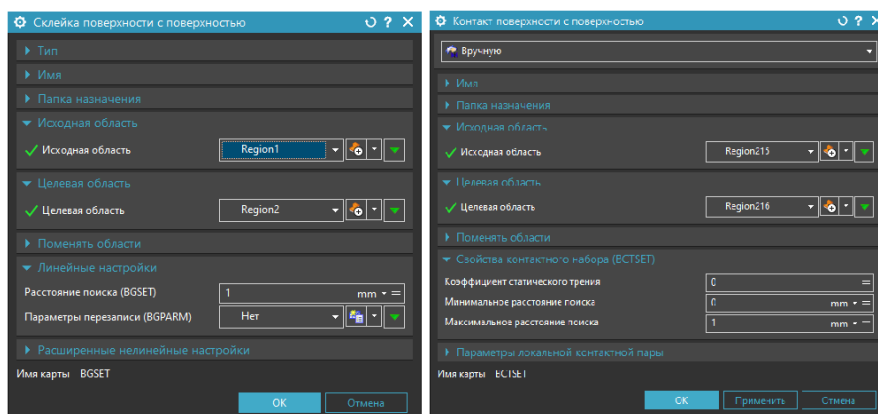


Рис. 11. Команды склейка и контакт поверхности с поверхностью

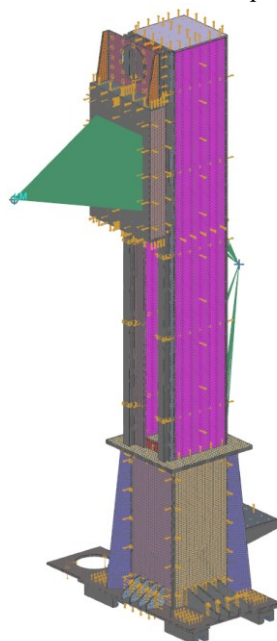


Рис. 12. Результат задания условий контактного взаимодействия

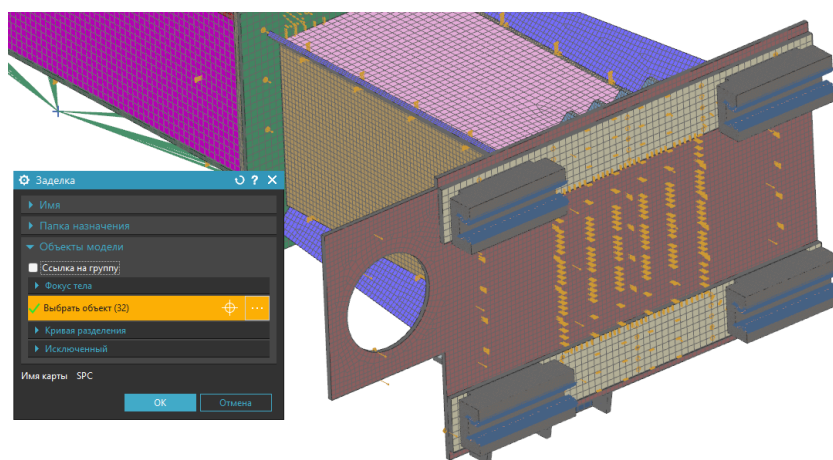
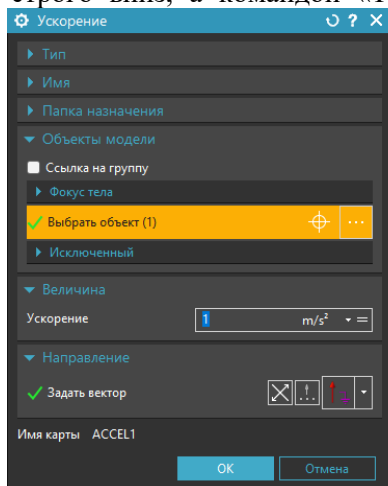


Рис. 13. Задание ограничения «Фиксация»

С помощью команды «Тип нагрузки: Сила» задается нагрузка от веса мотор-редукторов, блока, системы противовесов и веса катушки с

проволокой. Также командой «Тип нагрузки: Сила тяжести» задаётся нагрузка от веса кон-

струкции роботизированной ячейки, вектор которой направлен строго вниз, а командой «Тип



нагрузки: Ускорение» задаётся сила от мгновенного ускорения робота KUKA (рис. 14).

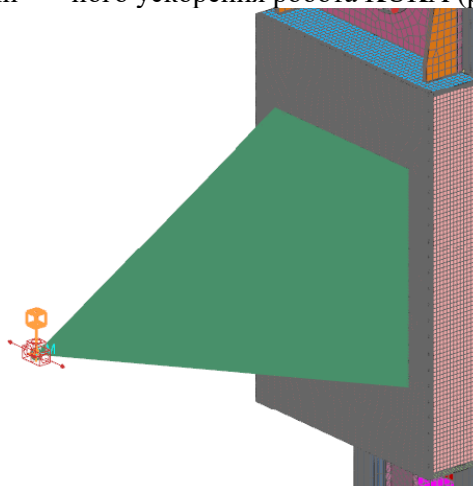


Рис. 14. Задание нагрузки «Ускорение»

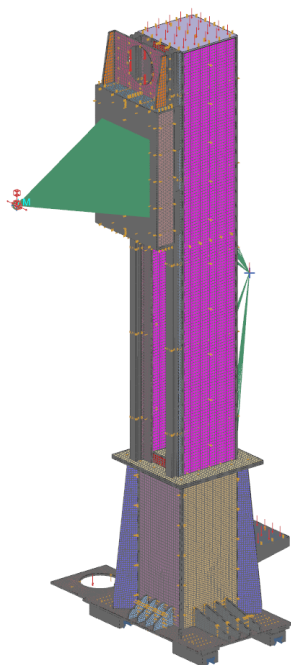


Рис. 15. Финальный вид КЭ сборки

Для того, чтобы сделать вывод о работоспособности конструкции (рис. 15) при выбранных ограничениях и нагрузках, необходимо произвести проверку условий прочности и жесткости. Для этого были рассмотрены результаты случая расчёта с наибольшим значением напряжений и перемещений, а именно случая, при котором вектор силы от мгновенного ускорения робота KUKA направлен горизонтально влево.

На рисунке 16 представлена диаграмма распределения напряжений в конструкции роботизированной ячейки, из которой видно, что максимальное значение напряжений находится в области соприкосновения каретки тележки робота и направляющей стойки, а значение составляет

26,24 МПа. На рисунке 17 представлена диаграмма распределения перемещений в конструкции роботизированной ячейки, из которой видно, что максимальное значение перемещений находится в области посадочной поверхности тележки стойки и составляет 0,439 мм.

Условие прочности предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n]; \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса прочности; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для выбранного материала, $\sigma_{\max}$ – максимальные расчетные напряжения, $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 1 \dots 2$.

Условия жесткости есть сравнение максимальных перемещений с допускаемыми:

$$\delta_{\max} \leq [\delta]; \quad (2)$$

где $\delta_{\max}$ – максимальные расчетные перемещения, $[\delta]$ – допускаемые перемещения.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot a; \quad (3)$$

где a – габаритный размер конструкции.

$$n = \frac{205}{26,24} = 7,8;$$

$$7,8 < 4,7.$$

Условие прочности выполняется.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 1175 = 4,7;$$

$$0,439 < 4,7.$$

Условие жесткости выполняется.

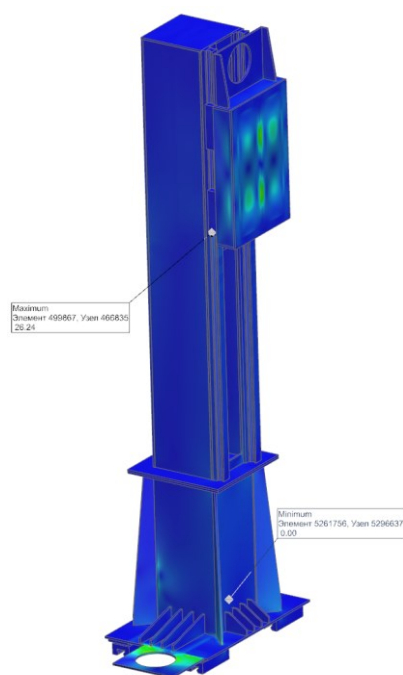


Рис. 16. Диаграмма распределения напряжения по Мизесу

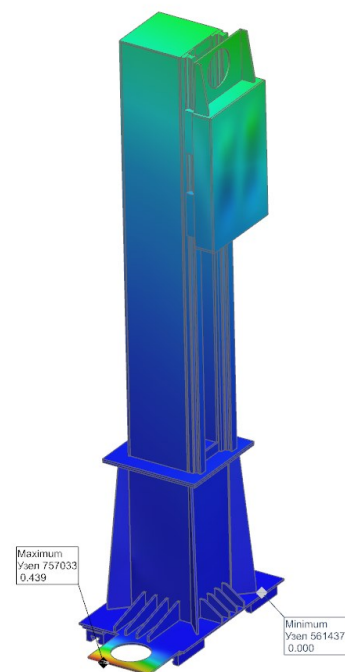


Рис. 17. Диаграмма распределения перемещений

Выводы. В статье был рассмотрен структурный анализ роботизированной ячейки. Интеграция его в жизненный цикл изделия, позволяет выпускать инновационные изделия в срок и с требуемыми характеристиками. Был выполнен структурный анализ роботизированной ячейки, проанализировав который, можно сделать вывод, что коэффициент запаса прочности и жесткости конструкции полностью удовлетворяет предельным условиям, а это означает, что конструкция работоспособна.

Полученные в статье расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

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. Белецкая С.Ю., Иевлев П.В., Муратов А.В., Тураева Т.Л., Турецкий А.В., Худяков Ю.В. Средства инженерного анализа конструкций радиоэлектронных модулей третьего уровня // НиКа. 2017. №. 2. С. 2–4.
2. Лоборева Л.А. Программное обеспечение OLP промышленных роботов-манипуляторов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2018. №4. С 108–116.

3. Шагисултанова Ю.Н., Панфилов А.В.К вопросу о структурном анализе сооружений для формирования расчётной конструктивной схемы // Мир науки. Педагогика и психология. 2022. № 6. С. 1–12.

4. Тимофеев Г.А., Самсоненко Д.М. Структурный анализ ромбического механизма с развитым шатуном рабочей группы двигателя стирлинга // Известия вузов. Машиностроение. 2021. №8 (737). С. 20–26. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-20-26

5. Божко А.Н. Структурный анализ машиностроительных конструкций. Перебазирование и линеаризация // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. 2018. № 2. С. 28–34.

6. Павлов С. Системы электронного и электротехнического проектирования в 2015 году: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2016. № 3 (103). С. 6–17.

7. Павлов С.И. САЕ-технологии в 2015 году: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2016. №4 (104). С. 6–16.

8. Kodirov Nodirbek, Mirzahidova Ozoda Finite Element Analysis of Track Structure // Univer-sum: технические науки. 2022. № 9-5(102). Рр. 46–49.

9. Бергер Ф., Такер С. Интегрированный инжиниринг и анализ авиационных конструкций //

Машиностроение и смежные отрасли. 2018. № 2 (119). С. 25–31.

10. Md Nahid Hasan, MA Muktadir, Manjurul Alam. Comparative study of tapered shape bimorph piezoelectric energy harvester via finite element analysis // Force in Mechanics. 2022. № 9. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100131

11. Yachong Xu, Yan Zhuge, Md. Rajibul Karim. Structural analysis of a 3D dry-stack tyre wall by finite-discrete element method // Engineering Structures. 2023. № 281. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.11578

12. James D.S. Hooton, David E.P. Gonçalves, Carlos M.C.G. Fernandes. Experiments and finite element analysis on a hybrid polymer gear rack // Mechanism and Machine Theory. 2023. № 186. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105363

13. Fernandes C.M., Rocha D.M., Martins R.C. Finite element method model to predict bulk and flash temperatures on polymer gears. Tribol. 2018. № 120. Pp. 255–268. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.027

14. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M., Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case studies in construction materials. 2023. № 19. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02360

15. Yongqiang Chen, Zhaoguo Ye, Zhuangzhe Zhao. Design and simulation analysis of physical heat dissipation structure for welding robot controller // Results in Physics. 2023. № 54. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107056

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Сычёв Евгений Андреевич, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Литвишко Александр Александрович, магистр кафедры «Механическое оборудование». E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила в 20.10.2023 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А., 2023

***Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

ENGINEERING ANALYSIS OF A ROBOTIC CELL OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION

Abstract. The article presents an engineering analysis of a robotic cell. Definitions of CAD/CAM/CAE systems are considered. The main developers of specialized software for engineering analysis are presented, which include: Siemens PLM Software; ANSYS; APM Scientific and Technical Center; TESIS; NUMECA. In modern times, designs and products have evolved at a record pace, and this suggests that their composition has become the most complex and more effective. The engineering analysis of the robotic cell is performed in the consolidated Simcenter 3D platform. The presented platform includes a huge list of CAE applications, which allows meeting modern requirements for the design and improvement of products. The main industries that use software for structural analysis are the aerospace industry, mechanical engineering, medicine, robotics and others. The paper describes the main stages of engineering analysis and what it implies. During preparing for the calculation, a calculation scheme is created and operational loads are determined. The material is also assigned to the main structural elements and guides with carriages. At the end of the engineering

analysis, the strength and stiffness coefficients are calculated. The conclusions are generalized that the calculated and experimental data can be used to verify more complex mathematical models.

Keywords: CAE, computer design, engineering analysis, robotic cells, loads, constraints, Simcenter 3D, CAD/CAM/CAE-system.

REFERENCES

1. Beletskaya S.Yu., Ievlev P.V., Muratov A.V., Turaeva T.L., Turk A.V., Khudyakov Yu.V. Means of engineering analysis of designs of radio-electronic modules of the third level [Sredstva inzhernogo analiza konstrukcij radioelektronnykh modulej tret'ego urovnya]. *NiKa*. 2017. No. 2. Pp. 2–4. (rus)
2. Lobareva L.A. Software for OLP industrial robot manipulators [Programmnoe obespechenie OLP promyshlennykh robotov-manipulyatorov]. *Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 2018. No. 4. Pp. 108–116. (rus)
3. Shagisultanova Yu.N., Panfilov A.V. On the question of structural analysis of structures for the formation of a design design scheme [K voprosu o strukturnom analize sooruzhenij dlya formirovaniya raschyotnoj konstruktivnoj skhemy]. *Mir nauki. Pedagogy and Psychology*. 2022. No. 6. Pp. 1–12. (rus)
4. Timofeev G.A., Samsonenko D.M. Structural analysis of a rhombic mechanism with a broken connecting rod of the Stirling engine working group [Strukturnyj analiz rombicheskogo mekhanizma s razvitym shatunom rabochej gruppy dvigatelya stirlinga]. *News of universities. Mechanical Engineering*. 2021. No. 8 (737). Pp. 20–26. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-20-26. (rus)
5. Bozhko A. N. Structural analysis of machine-building structures. Rebasng and linearization [Strukturnyj analiz mashinostroitel'nykh konstrukcij. Perebazirovaniye i linearizatsiya]. *Management systems for the full life cycle of high-tech products in mechanical engineering: New sources of growth*. 2018. No. 2. Pp. 28–34. (rus)
6. Pavlov S. Systems of electronic and electro-technical design in 2015: review of achievements and market analysis [Sistemy elektronnoy i elektrotekhnicheskoy proektirovaniya v 2015 godu: obzor dostizhenij i analiz rynka]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2016. No. 3 (103). Pp. 6–17. (rus)
7. Pavlov S.I. CAE-technologies in 2015: review of achievements and market analysis [CAE-tehnologii v 2015 godu: obzor dostizhenij i analiz rynka]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2016. No.4 (104). Pp. 6–16. (rus)
8. Kodirov Nodirbek, Mirzahidova Ozoda Finite Element Analysis of Track Structure. *Univer-sum: technical science*. 2022. No. 9-5 (102). Pp. 46–49.
9. Berger F., Tucker S. Integrated engineering and analysis of aircraft structures [Integrirrovannyj inzhiniring i analiz aviacionnykh konstrukcij]. *Mechanical engineering and related industries*. 2018. No. 2 (119). Pp. 25–31. (rus)
10. Md Nahid Hasan, MA Muktadir, Manjurul Alam. Comparative study of tapered shape bimorph piezoelectric energy harvester via finite element analysis. *Force in Mechanics*. 2022. No. 9. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100131
11. Yachong Xu, Yan Zhuge, Md. Rajibul Karim. Structural analysis of a 3D dry-stack tyre wall by finite-discrete element method. *Engineering Structures*. 2023. No. 281. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.11578
12. James D.S. Hooton, David E.P. Gonçalves, Carlos M.C.G. Fernandes. Experiments and finite element analysis on a hybrid polymer gear rack. *Mechanism and Machine Theory*. 2023. Vol. 186. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105363
13. Fernandes C.M., Rocha D.M., Martins R.C. Finite element method model to predict bulk and flash temperatures on polymer gears. *Tribol.* 2018. No. 120. Pp. 255–268. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.027
14. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M., Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure. *Case studies in construction materials*. 2023. No. 19. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02360
15. Yongqiang Chen, Zhaoguo Ye, Zhuangzhe Zhao. Design and simulation analysis of physical heat dissipation structure for welding robot controller. *Results in Physics*. 2023. No. 54. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107056

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Sychev, Evgeniy A. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Litvishko, Alexander A. Master of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 20.10.2023

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А. Инженерный анализ роботизированной ячейки машиностроительного производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 138–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. Engineering analysis of a robotic cell of machine-building production. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 138–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149