

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

№ 5, 2019 год

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, произ

водства строительных материалов и композитов специального назначения, химических технологий, машиностроения и машиноведения, освещающие актуальные проблемы отраслей знания, имеющие теоретическую или практическую значимость, а также направленные на внедрение результатов научных исследований в образовательную деятельность.

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

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

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

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

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

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

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

Online подписка: <http://www.akc.ru/itm/2558104627/>

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ МГСУ (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фишер Ханс-Бертрам, Dr.-Ing., заместитель заведующего кафедрой "Строительные материалы" Баухаус-Университет Ваймар (Германия, г. Веймар).

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

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 (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).

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

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

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

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

Andrey G. Bol'shakov, Doctor of Architecture, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Russian Federation, Irkutsk).

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, Stavropol).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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" KERAM-BET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ	8
Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Литовченко Д.П., Барковский Д.В., Ширяев А.О. ПЛАСТИФИКАТОР ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ – КАК НЕОБХОДИМОСТЬ	16
Логанина В.И., Кислицына С.Н., Сергеева К.А. РАЗРАБОТКА СОСТАВА АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ	23
Сулейманова Л.А., Кочерженко А.В., Рябчевский И.С. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ВСПЕНИВАНИЯ ОТ СРЕДНЕГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ПЕНОПОЛИУРЕТАНА	28
Шорстов Р.А. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И РЕЦЕПТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА	36
Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Жихарев Н.Д. ДЕФОРМАЦИИ РАСТВОРА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ШВОВ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СЖАТИИ	42
Иконников С.Ю., Блажнов А.А. КОРРОЗИЯ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЕ ШАМПИньОННИЦЫ	50
Николукин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ	56
Аль-Хаваф А. Ф.-К., Никулин А.И. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ИЗ БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ БЕТОННОГО ЩЕБНЯ	66
Кужахметова Э.Р. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВАНТ В ЦИЛИНДРО-ПЛИТНО-ВАНТОВОМ (ЦПВ) ПОКРЫТИИ ЗДАНИЯ (СООРУЖЕНИЯ)	77
Давиденко П.В., Кладиев Н.Н., Наумов А.Е., Жариков И.С., Ерижокова Е.С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ НЕЗАВЕРШЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ	90
Князева Н.В., Лёвина Д.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-СЦЕНАРИЕВ В РАБОТЕ СЛУЖБ ЭКСПЛУАТАЦИИ	99
Ильина Т.Н., Емельянов Д.А. О РОЛИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АГЛОМЕРАЦИИ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ	106
Былова Н.С., Акчурина Н.С. ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ОМСКА XIX-XX ВВ	112
Аль-Джабери А.А.Х., Перькова М.В., Иванькина Н.А., Аль-Савафи М.Х. ТИПОЛОГИЯ ТРАНЗИТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ	120

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Строкова В.В., Жерновский И.В., Тесля А.Ю., Алфимова Н.И. МОДИФИКАЦИЯ НИЗКОАКТИВНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СИНТЕЗЕ ГЕОПОЛИМЕРОВ	131
Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ОЛИГОСУЛЬФОНОВ. ЧАСТЬ 2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА	140

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Круглова Т.Н., Власов А.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛНОПРИВОДНЫМ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНЫМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ	147
Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н. МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОИЗВОДНЫХ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА	155
Семикопченко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗОЧНОГО УЗЛА ДЕЗИНТЕГРАТОРА ПРИ УСТАНОВКЕ ПАТРУБКА РЕЦИКЛА МАТЕРИАЛА	165

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. PHYSICO-MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FOAM- GLASS CERAMICS BASED ON SILICA ROCK	8
Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Litovchenko D.P., Barkovsky D.V., Shiriaev A.O. THE NEED FOR A PLASTICIZER IN THE PRODUCTION OF POLYMERIC-BITUMEN BINDERS	16
Loganina V.I., Kislitsyn S.N., Sergeev K.A. DEVELOPMENT OF ANTI-ICING COATING	23
Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V., Ryabchevskiy I.S. DEPENDENCE OF FOAMING COEFFICIENT ON THE AVERAGE HARMONIC DIAMETER OF POLYURETHANE FOAM	28
Shorstov R.A. REGULATION OF PROCESS AND RECIPE PARAMETERS ON THE BASIS OF MODELING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE	36
Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N., Zhikharev N.D. DEFORMATION OF HORIZONTAL JOINTS' MORTAR OF MASONRY UNDER COMPRESSION	42
Ikonnikov S.Yu., Blazhnov A.A. CORROSION OF GALVANIZED STEEL AND ALUMINUM ALLOYS IN THE INDUSTRIAL ENVIRONMENT OF CHAMPIGNON	50
Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Kolomnikova I.I. NUMERICAL MODELING OF COMPOSITE FITTINGS FOR CLUTCHING WITH CONCRETE	56
Al'-Khavaf A. F-K., Nikulin A.I. DEFORMATION OF CENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH ADDITION OF CONCRETE RUBBLE AS COARSE AGGREGATE	66
Kuzhakhmetova E. R. CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF GUYS LOCATION IN CYLINDRICAL-SLAB-GUY COVERING OF BUILDING (CONSTRUCTION)	77
Davidenko P.V., Kladiev N.N., Naumov A.E., Zharikov I.S., Erizhokova E.S. IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR ESTIMATING DEFORMATIONS IN STRUCTURES OF UNFINISHED CONSTRUCTIONS AT THE PROCESS OF TECHNICAL EXPERTISE	90
Knyazeva N.V., Levina D.A. USING BIM SCENARIOS IN OPERATION SERVICES	99
Il'ina T.N., Emel'anov D.A. ON THE ROLE OF SURFACE INTERACTIONS OF PARTICLES OF A FIBROUS STRUCTURE DURING AGGLOMERATION IN AN AIR STREAM	106
Bylova N.S., Akchurina N.S. EXPERIENCE OF STUDYING THE INDUSTRIAL ARCHITECTURE OF OMSK IN THE XIX-XX CENTURIES	112
Al-Jaberi A.A.H., Perkova M.V., Ivankina N.A., Al-Sawafi M.H. TYPOLOGY OF TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT	120

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Kozhukhova M.I., Strokova V.V., Zhernovsky I.V, Teslya A.Y., Alfimova N.I. MODIFICATION OF LOW-REACTIVE ALUMINOSILICATES AS A METHOD FOR IMPROVEMENT OF ITS QUALITY WHEN GEOPOLYMER SYNTHESIS	131
Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. PROPERTIES OF COMPOSITIONAL MATERIALS BASED ON THE MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND OLIGOSULPHONES. PART 2. STATIC AND DYNAMIC RELAXATION PROPERTIES	140

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Kruglova T.N., Vlasov A.S. MODELING OF THE MANAGEMENT SYSTEM OF A FULL-DRIVE FOUR-WHEEL AGRICULTURAL MOBILE ROBOT	147
Pozevalkin V.V., Parfenov I.V., Polyakov A.N. MODULE OF PROCESSING EXPERIMENTAL THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINE TOOLS IN REAL-TIME MODE USING HIGH ORDER DERIVATIVES	155
Semikopenko I.A., Voronov V.P., Smirnov D.V. THE DESIGN PARAMETERS OF A BOOT NODE OF THE DISINTEGRATOR AT INSTALLATION OF PIPE RECYCLE MATERIAL	165

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374

¹Ерофеев В.Т., ^{1,*}Родин А.И., ¹Кравчук А.С., ¹Ермаков А.А.¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68

*E-mail: AL_Rodin@mail.ru

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ

Аннотация. Получение пеностеклокерамических строительных материалов минуя процесс высокотемпературной варки стекломассы, а также использование в качестве сырья местные горные породы, позволяющие значительно снизить стоимость конечного продукта – актуальная задача современного строительного материаловедения. Целью данной работы было изучение физико-механических и теплофизических свойств пеностеклокерамических строительных материалов, полученных за один нагрев шихты, состоящей из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды. Разработанные теплоизоляционные строительные материалы имеют среднюю плотность от 200 до 600 кг/м³, прочность при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа, теплопроводность от 0,053 до 0,065 Вт/м·°С. Исследованиями установлено рациональное соотношение компонентов в составах пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы. При производстве вспененных материалов, скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до 4,5 °С/мин, а максимальная температура нагрева от 800 до 850 °С. Разработанный материал расширит номенклатуру теплоизоляционных строительных материалов и может быть использован при строительстве объектов промышленного и гражданского назначения, в том числе АЭС, в газо- и нефтепромышленности.

Ключевые слова: пеностеклокерамика, теплоизоляционный материал, кремнеземсодержащая порода, прочность, плотность, теплопроводность.

Введение. В последние годы пеностекло материалы на основе пеностекла все в большем объеме используются в строительной отрасли. Данные материалы легкие, обладают низкой теплопроводностью, достаточной эксплуатационной прочностью, не дают усадки и не изменяют геометрические размеры с течением времени под действием эксплуатационных нагрузок, выдерживают высокие температуры, являются коррозионностойкими. Все это позволяет рекомендовать данный материал в качестве утеплителя при строительстве АЭС, в газо- и нефтепромышленности, промышленном и гражданском строительстве [1–3]. Самая крупная транснациональная корпорация «Pittsburgh Corning», имеющая ряд заводов в США и Европе, является самым крупным поставщиком высококачественной теплоизоляционной продукции на основе пеностекла в Россию. С конца 90-х годов прошлого века вопрос создания производства пеностекла в России встал особенно остро, причиной этому являются суровые климатические условия, ужесточение теплотехнических требований к ограждающим конструкциям, рост цен на данный вид теплоизоляционных материалов и др. [3–6]. Именно в этот период в России возобновляется производство пеностекла на заводах: «СТЭС-Владимир» (г. Владимир), «Пеноситал» (г. Пермь),

«PENOSTEK» и «SAiTAX» (Московская область) и др.

Технология производства пеностекла достаточно сложная и включает несколько этапов. Сначала этапе производят варку стекла, затем, остывшее стекло размалывают с газообразующими добавками и повторно нагревают с последующим отжигом полученного материала. Современные научные исследования в области получения строительных материалов из пеностекла имеют следующие направления: поиск способов производства пеностекла без материалоёмких форм [7–8]; низкотемпературный синтез стекломассы без применения стеклоплавильных агрегатов; вспенивание шихты, минуя процесс высокотемпературной варки стекломассы [8–14]; расширение сырьевой базы за счёт применения различных видов стёкол, стеклобоя и местных горных пород, позволяющее значительно увеличить доступность сырья и, одновременно, снизить стоимость конечного продукта [7–20] и др.

Предлагаемое нами направление научного исследования подразумевает отказ от первой стадии (варка стекла), а варку и вспенивание шихты осуществлять за один нагрев, что позволит значительно сократить технологические затраты. Кроме того, данная технология позволяет ис-

пользовать в производстве дешевое сырье (диатомит, трепел, опока и т.п.), имеющееся в большом количестве в различных регионах России.

Целью данной работы являлось изучение физико-механических и теплофизических свойств пеностеклокерамических строительных материалов, полученной за один нагрев шихты, состоящей из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды.

Методология. В качестве сырья для получения пеностеклокерамики использовались:

- кремнеземсодержащая порода (трепел) месторождения близ с. Енгальчево, Дубенского района, Республики Мордовия, следующего химического состава: SiO_2 – 71,00 %, CaO – 9,01 %, Al_2O_3 – 8,90 %, Fe_2O_3 – 2,86 %, K_2O – 2,06 %, MgO – 1,61 %, TiO_2 – 0,444 %, Na_2O – 0,252 %, P_2O_5 – 0,171 %, SrO – 0,064 %, BaO – 0,029 %, SO_3 – 0,027 %, ZrO_2 – 0,017 %, V_2O_5 – 0,012 %, MnO – 0,012 %, Cr_2O_3 – 0,009 %, Rb_2O – 0,010 %, CuO – 0,008 %, ZnO – 0,005 %, ППП – 3,50 % и минералогического состава: кристобалит (SiO_2) – 42,1 %, гейландит $((\text{Ca}, \text{Sr}, \text{K}_2, \text{Na}_2)[\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}] \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ – 17,7 %, мусковит $(\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2)$ – 14,4 %, кальцит (CaCO_3) – 13,9 %, кварц (SiO_2) – 11,2 %, тридимит (SiO_2) – 0,7 %.

- сода кальцинированная техническая первого сорта, отвечающая требованиям ГОСТ 5100-85. Химическая формула Na_2CO_3 .

Шихту для изготовления пеностеклокерамики получали совместным помолом, высушенной до постоянной массы при $t = 105^\circ\text{C}$, вышеуказанной породы и кальцинированной соды до достижения удельной поверхности не менее $1\,000\text{ м}^2/\text{кг}$. При выполнении исследований рассматривалась шихта с соотношением трепел/ Na_2CO_3 в пределах от 85/15 до 80/20. Полученная шихта засыпалась в металлическую форму, предварительно обработанную каолиновой обмазкой, и уплотнялась. Форма с шихтой устанавливалась в муфельную печь и нагревалась со скоростью от $1,5$ до $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до различных температур в пределах от 750 до 950°C с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 мин. После остывания формы с полученным материалом вместе с печью до комнатной температуры, она разбиралась, а материал извлекался для дальнейших испытаний.

Физико-механические свойства разрабатываемого материала определялись в соответствии с ГОСТ 33949-2016.

Коэффициент теплопроводности определялся зондовым методом в соответствии с ГОСТ 30256-94.

Основная часть. На рис. 1 приведены результаты исследования по определению зависи-

мости изменения средней плотности и прочности при сжатии пеностеклокерамических материалов от состава, скорости нагрева и максимальной температуры нагрева шихты.

При определении зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии пеностеклокерамики от состава шихты (соотношение трепел / Na_2CO_3 от 85/15 до 80/20), ее нагревали до температуры 850°C со скоростью $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Согласно полученным данным (рис. 1, а), средняя плотность пеностеклокерамики незначительно уменьшается с 600 до $570\text{ кг}/\text{м}^3$ при увеличении содержания в шихте кальцинированной соды с 15 до 17,5 %. Дальнейшее увеличение в шихте соды до 20 % приводит к прямопропорциональному уменьшению плотности материала до $220\text{ кг}/\text{м}^3$. Прочность при сжатии полученного материала от вышеуказанных факторов имеет аналогичную зависимость. При увеличении содержания в шихте Na_2CO_3 с 15 до 17,5 % прочность при сжатии уменьшается незначительно с 9,8 до $8,2\text{ МПа}$. С увеличением количественного содержания соды до 20 %, прочность при сжатии уменьшается до $1,2\text{ МПа}$.

Проведенными исследованиями установлено, что при изготовлении пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды рациональное содержание последней находится в пределах от 15 до 20 %. Дальнейшее увеличение Na_2CO_3 приведет к значительному увеличению жидкой фазы, неоднородности структуры, а также стоимости конечного продукта.

Исследования на следующем этапе были посвящены установлению зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии полученного материала от скорости нагрева шихты (рис. 1, б). С этой целью шихта, содержащая в составе 20 % кальцинированной соды, нагревалась в муфельной печи до температуры 850°C со скоростью от $1,5$ до $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 минут. Согласно полученным данным, средняя плотность материала увеличивается практически прямопропорционально с 220 до $285\text{ кг}/\text{м}^3$ при уменьшении скорости нагрева с $4,5$ до $1,5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Прочность при сжатии разрабатываемого материала в сухом состоянии увеличивается прямопропорционально с $1,3$ до $1,5\text{ МПа}$ при уменьшении скорости нагрева с $4,5$ до $3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Дальнейшее уменьшение скорости нагрева до $1,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ приводит к увеличению прочности при сжатии вспененного материала до $1,9\text{ МПа}$.

Согласно проведенным исследованиям установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей

породы (трепел) и кальцинированной соды скорость ее нагрева должна варьироваться от 3 до 4,5

°C/мин. Увеличение скорости нагрева шихты более 4,5 °C/мин приводит к увеличению неоднородности структуры конечного продукта.

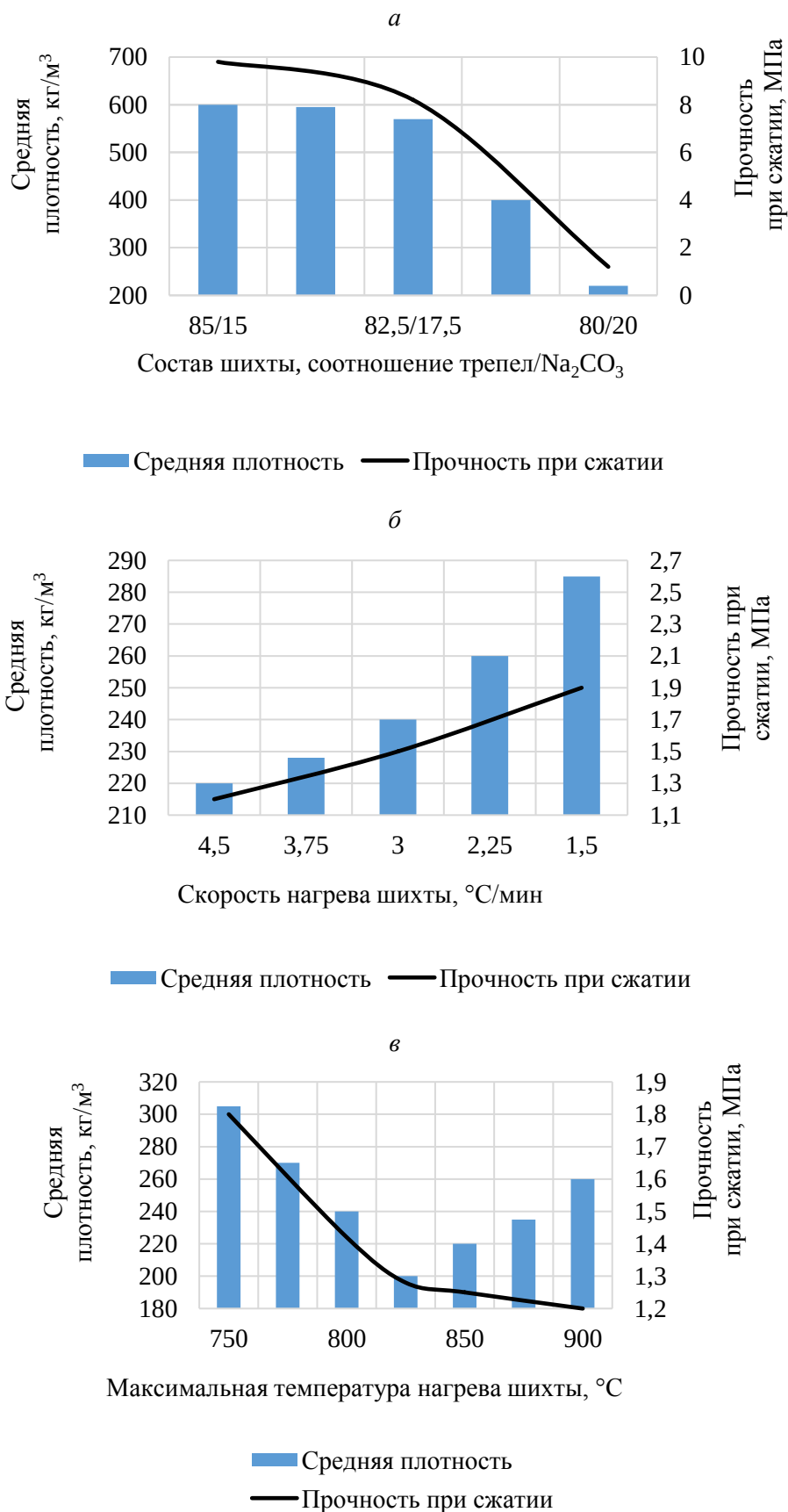
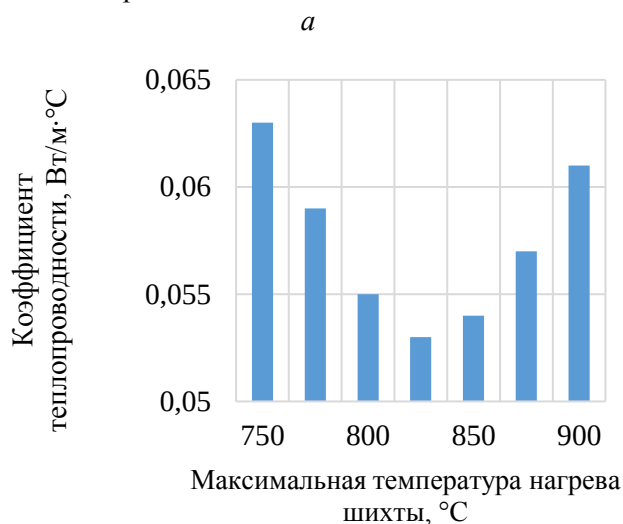


Рис. 1. Влияние состава (а), скорости нагрева (б) и максимальной температуры нагрева (в) шихты на среднюю плотность и прочность при сжатии пеностеклокерамики

Важными являются исследования, направленные на установление зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии разрабатываемых материалов от максимальной температуры нагрева шихты. С этой целью шихта с соотношением трепел / Na_2CO_3 равном 80/20 нагревалась в муфельной печи со скоростью $4^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры от 750 до 900°C с выдержкой при максимальной температуре 30 минут. Согласно полученным данным (рис. 1, в), средняя плотность полученного материала уменьшается прямопропорционально с 305 до $200\text{ кг}/\text{м}^3$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты с 750 до 820°C . Дальнейшее увеличение температуры нагрева до 900°C приводит к увеличению средней плотности до $260\text{ кг}/\text{м}^3$. Данный эффект объясняется увеличением жидкой фазы в шихте и, как следствие, меньшей устойчивостью пены, что приводит к ее оседанию. Также необходимо отметить увеличение пор в материале при повышении максимальной температуры нагрева шихты до 900°C . Прочность при сжатии полученного материала в сухом состоянии уменьшается с $1,8$ до $1,2\text{ МПа}$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты с 750 до 900°C .

Проведенными исследованиями установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды максимальная температура ее нагрева должна варьироваться в пределах от 800 до 850°C .



На рис. 2 представлены результаты исследований по изучению зависимостей изменения теплопроводности пеностеклокерамических материалов от максимальной температуры и скорости нагрева шихты. С этой целью шихта с соотношением трепел / Na_2CO_3 равном 80/20 нагревалась в муфельной печи со скоростью от $1,5$ до $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до максимальной температуры от 750 до 900°C с выдержкой при данной температуре в течение 30 минут и последующим остыванием в форме вместе с печью до комнатной температуры.

Согласно полученным данным (рис. 2, а), теплопроводность разрабатываемого материала уменьшается прямопропорционально с $0,063$ до $0,053\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты (скорость нагрева равна $4^\circ\text{C}/\text{мин}$) с 750°C до 820°C . При дальнейшем увеличении максимальной температуры до 900°C теплопроводность увеличивается до $0,061\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$.

Согласно данным рисунка 2, б, теплопроводность вспененного материала уменьшается прямопропорционально с $0,068\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ до $0,053\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ при увеличении скорости нагрева шихты (максимальная температура нагрева равна 820°C) с $1,5$ до $3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Дальнейшее увеличение скорости нагрева шихты до $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ не оказывает существенного влияния на изменение теплопроводности полученного материала.

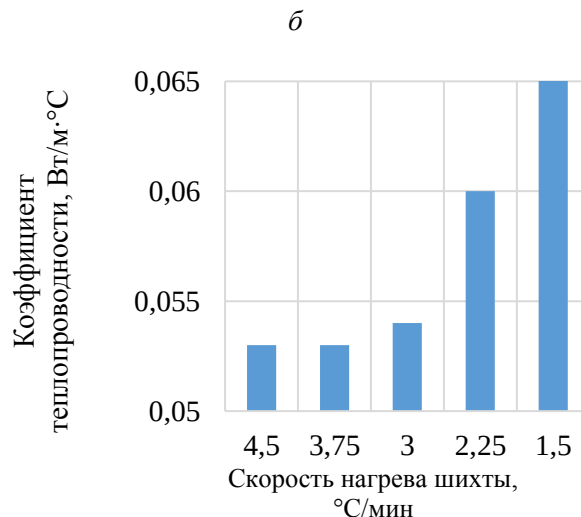


Рис. 2. Зависимости изменения теплопроводности полученного материала от максимальной температуры (а) и скорости нагрева (б) шихты

Установлено, что для получения наименьшей теплопроводности разрабатываемого материала скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$, а максимальная температура нагрева от 800 до 850°C .

Выводы.

1. Разработаны теплоизоляционные строительные материалы на основе трепела и кальцинированной соды, получаемые за один нагрев

шихты, плотностью от 200 до 600 кг/м³, прочностью при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа, коэффициентом теплопроводности от 0,053 до 0,065 Вт/м °С.

2. Установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (представленный трепел) и кальцинированной соды рациональное содержание последней должно находиться в пределах от 15 до 20 %, скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до 4,5 °С/мин, а максимальная температура нагрева от 800 до 850 °С.

Источник финансирования. Грант Российского научного фонда (проект № 18-73-00213).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). 2008. Vol. 65. №. 3-4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.
2. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Пряженцева Е.А. Стратегический анализ и оценка рыночных перспектив материалов и изделий из пеностекла // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 6. С. 15–20. DOI: 10.12737/article_5b115a5f648ca5.27747964.
3. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256.
4. Erofeev V., Korotaev S., Bulgakov A., Tretiakov I., Rodin A. Getting Fired Material with Vitreous Binder Using Frame Technology // *Procedia Engineering*. 2016. 164. Pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.606.
5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 64. №. 4. Pp. 10–25. DOI: 10.5862/MCE.64.2.
6. Ерофеев В.Т., Бредихин В.В., Богатов А.Д., Богатова С.Н. Ячеистые и поризованные бетоны на основе боя стекла // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 1 (46). С. 104–111.
7. Иванов К.С., Радаев С.С., Селезнева О.И. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла // *Стекло и керамика*. 2014. № 5. С. 15–19.
8. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. №. 14. Pp. 15261–15268. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
9. Казанцева Л.К., Верещагин В.И., Овчаренко Г.И. Вспененные стеклокерамические теплоизоляционные материалы из природного сырья // *Строительные материалы*. 2001. № 4. С. 33–35.
10. Manevich V.E., Subbotin R.K., Nikiforov E.A., Senik N.A., Meshkov A.V. Diatomite - Siliceous material for the glass industry // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). 2012. Vol. 69. №. 5-6. Pp. 168–172. DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
11. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. №. 2. Pp. 2370–2377. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034.
12. Кетов А.А. Получение строительных материалов из гидратированных полисиликатов // *Строительные материалы*. 2012. № 11. С. 22–24.
13. Орлов А.Д. Оптимизированная одностадийная технология гранулированного пеностекла на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы // *Строительные материалы*. 2015. № 1. С. 24–26.
14. Сеник Н.А., Мешков А.В., Виницкий А.Л., Вакалова Т.В., Верещагин В.И. Получение высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе диатомита путем низкотемпературного вспенивания // *Техника и технология силикатов*. 2012. Т. 19. № 4. С. 6–12.
15. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). 2013. Vol. 70. №. 7-8. Pp. 277–281. DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
16. Иваненко В.Н. Строительные материалы и изделия из кремнистых пород. Киев: Будивельник, 1978. 120 с.
17. Никитин А.И., Стороженко Г.И., Казанцева Л.К., Верещагин В.И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 34–37.
18. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. №. 1. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
19. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Novel 'inorganic gel casting' process for the manufacturing of glass foams // *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. No.5. Pp. 2227–2234. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2017.01.012.

20. Zhang Q., He F., Shu H., Qiao Y., Mei S., Jin M., Xie J. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 111. Pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

Информация об авторах

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Родин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Кравчук Алексей Сергеевич, аспирант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Ермаков Анатолий Анатольевич, магистрант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Поступила в марте 2019 г.

© Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А., 2019

¹Erofeev V.T., ^{1,*}Rodin A.I., ¹Kravchuk A.S., ¹Ermakov A.A.

¹National Research Mordovia State University
Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68

*E-mail: AL_Rodin@mail.ru

PHYSICO-MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FOAM- GLASS CERAMICS BASED ON SILICA ROCK

Abstract. Obtaining the foam-glass ceramic building materials bypassing the process of high-temperature glass melting and the use of local rocks as raw materials, which can significantly reduce the cost of the final product, is an urgent task of modern building materials science. The aim of this work is to study the physical, mechanical and thermal properties of foam-glass ceramic building materials obtained by one heating of the mixture consisting of silica-containing rock (tripoli) and soda ash. The developed heat-insulating building materials have an average density of 200 to 600 kg/m³, compressive strength of 1,2 to 9,8 MPa, thermal conductivity of 0,053 to 0,065 W/m·°C. Studies establishes a rational ratio of components in the composition of foam glass ceramics based on silica rock. In the production of foam materials, the heating rate of the charge should vary from 3 to 4,5 °C / min, and the maximum heating temperature from 800 to 850 °C. The developed material will expand the range of thermal insulation building materials and can be used in the construction of industrial and civil facilities, nuclear power plants, in the gas and oil industry.

Keywords: foam glass ceramics, thermal insulation material, silica rock, strength, density, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation. Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). 2008. Vol. 65. No. 3–4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.
2. Shelkovnikova T.I., Baranov E.V., Pryazhenceva E.A. Strategic analysis and assessment of market prospects of foam glass materials and products [Strategicheskij analiz i ocenka rynochnyh perspektiv materialov i izdelij iz penostekla]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 6. Pp. 15–20. DOI: 10.12737/article_5b115a5f648ca5.27747964 (rus)

3. Min'ko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes [Ispol'zovanie stekloboya v tekhnologii materialov stroitel'nogo naznacheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 1. Pp. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256 (rus)

4. Erofeev V., Korotaev S., Bulgakov A., Tretyakov I., Rodin A. Getting Fired Material with Vitreous Binder Using Frame Technology. *Procedia Engineering*. 2016. 164. Pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.606.
5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 64. No. 4. Pp. 10–25. DOI: 10.5862/MCE.64.2.
6. Erofeev V.T., Bredihin V.V., Bogatov A.D., Bogatova S.N. Cellular and porous concrete on the basis of glass fight [*Yacheistye i porizovannye betony na osnove boya stekla*]. *Proceedings of Southwest state University*. 2013. No. 1 (46). Pp. 104–111. (rus)
7. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. The diatomite in the technology of granulated foam glass [*Diatomity v tekhnologii granulirovannogo penostekla*]. *Glass and Ceramics*. 2014. No. 5. Pp. 15–19. (rus)
8. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 14. Pp. 15261–15268. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
9. Kazantseva L.K., Vereshchagin V.I., Ovcharenko G.I. Foamed glass-ceramic thermal insulating materials from natural raw materials [*Vspennyye steklokeramicheskie teploizolyacionnye materialy iz prirodnogo syr'ya*]. *Building material*. 2001. Issue 4. Pp. 33–35. (rus)
10. Manevich V.E., Subbotin R.K., Nikiforov E.A., Senik N.A., Meshkov A.V. Diatomite - Siliceous material for the glass industry. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*, 2012. Vol. 69. No. 5–6. Pp. 168–172. DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
11. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 2. Pp. 2370–2377. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034
12. Ketov A.A. Obtaining construction materials from hydrated polysilicates [*Poluchenie stroitel'nykh materialov iz gidratirovannykh polisilikatov*]. *Building material*. 2012. No. 11. Pp. 22–24. (rus)
13. Orlov A.D. Optimized single-stage technology of granulated foam glass based on low-temperature synthesis of glass phase [*Optimizirovannaya odnostadijnaya tekhnologiya granulirovannogo penostekla na osnove nizkotemperaturnogo sinteza steklofazy*]. *Building material*. 2015. No. 1. Pp. 24–26. (rus)
14. Senik N.A., Meshkov A.V., Vinickij A.L., Vakalova T.V., Vereshchagin V.I. Production of high-performance thermal insulation material based on diatomite by low-temperature foaming [*Poluchenie vysokoehffektivnogo teploizolyacionnogo materiala na osnove diatomita putem nizkotemperaturnogo vspenivaniya*]. *Technique and technology of silicates*. 2012. Vol. 19. No. 4. Pp. 6–12. (rus)
15. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2013. Vol. 70. No. 7–8. Pp. 277–281. DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
16. Ivanenko V.N. Building materials and products from siliceous rocks [*Stroitel'nye materialy i izdeliya iz kremnistykh porod*]. Kiev: Budivelnik. 1978. 120 p. (rus)
17. Nikitin A.I., Storozhenko G.I., Kazanceva L.K., Vereshchagin V.I. Insulation materials and products based on diatomaceous earth Potanin field [*Teploizolyacionnye materialy i izdeliya na osnove trepelov Potaninskogo mestorozhdeniya*]. *Building material*. 2014. No. 8. Pp. 34–37. (rus)
18. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. No. 1. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
19. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Novel 'inorganic gel casting' process for the manufacturing of glass foams. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. No. 5. Pp. 2227–2234. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2017.01.012.
20. Zhang Q., He F., Shu H., Qiao Y., Mei S., Jin M., Xie J. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

Information about the authors

Erofeev, Vladimir T. Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Rodin, Aleksandr I. PhD, Assistant professor. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Kravchuk, Aleksej S. Postgraduate student. E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevikskaya, 68.

Ermakov, Anatolij A. Master student. E-mail: anately.ermakov97@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevikskaya, 68.

Received in March 2019

Для цитирования:

Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. Физико-механические и теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 8–15. DOI: 10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374

For citation:

Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Physico-mechanical and thermophysical properties of foam- glass ceramics based on silica rock. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374

DOI: 10.34031/article_5cd6df466bb9e0.32764094

^{1,*}Высоцкая М.А., ¹Кузнецов Д.А., ¹Литовченко Д.П., ¹Барковский Д.В., ¹Ширяев А.О.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

*E-mail: roruri@rambler.ru

ПЛАСТИФИКАТОР ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ – КАК НЕОБХОДИМОСТЬ

Аннотация. Стремление обеспечить эксплуатационную надежность покрытий автомобильных дорог в условиях роста нагрузок на ось автомобилей и интенсивности движения вызвало большую популярность асфальтобетонных смесей на полимерно-битумном вяжущем. Кроме того, актуальным направлением по обеспечению эксплуатационной надежности асфальтобетонных покрытий стало использование соответствующего типа вяжущего, подходящего для конкретных условий региона, маркируемого по PG. Однако стоит отметить, что обеспечение требуемого комплекса свойств ПБВ во многом зависит не только от процентного содержания полимера, но и от вида применяемого пластификатора. В статье представлены результаты сравнительных испытаний полимерно-битумных вяжущих, приготовленных с применением 6-ти различных пластифицирующих добавок. Исследована зависимость изменения показателей модифицированных вяжущих, а так же их термическая устойчивость. Даны рекомендации, позволяющие сохранить требуемый уровень физико-механических показателей ПБВ.

Ключевые слова: полимерно-битумное вяжущее (ПБВ), физико-механические свойства.

Введение. Важнейшей задачей, стоящей сегодня перед отечественной нефтеперерабатывающей промышленностью, является модернизация и углубление тяжелой нефтепереработки. Критерием эффективности переработки нефти являются объемы выхода светлых нефтепродуктов (бензина, керосина и др.) и смазочных масел. Внедряемые подходы и модернизация производства влекут существенные изменения в тоннаже и свойствах получаемых остатков, а также вносят диссонанс в систему «производитель – потребитель».

Ужесточение требований в сегменте дорожного – строительства к качеству «товарных» вяжущих: нефтяных битумов и их производных, диктует необходимость учета их реологических параметров на стадии подбора асфальтобетонных смесей и усугубляет ситуацию. В виду углубления нефтепереработки, тяжелые нефтяные остатки являются дисперсными системами с истощенной дисперсионной средой, и значительным содержанием дисперсионной фазы – асфальтенов. Это обуславливает необходимость корректировки группового состава вяжущего [1, 2] для восстановления баланса в содержании «асфальтены-мальтены». Особенно это актуально в случае модификации битума полимером, при приготовлении полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) [3].

Одним из приемов управления реологическими свойствами, как битума, так и ПБВ для различных условий эксплуатации и назначения является введение пластификаторов [4, 5]. Использование данного метода демонстрирует, что в системах, наполненных мальтеновой частью,

при объединении с полимером, наблюдается пластифицирующий эффект, способствующий развитию пластической деформации образцов, а не хрупкому разрушению, особенно при низких температурах. Это приводит к увеличению разрывных удлинений модифицированного вяжущего, энергии разрушения и эластичности.

Основная часть. В соответствии с законами коллоидной химии устойчивость дисперсных систем, к которым относятся битумы, зависит от степени сродства мальтеновой части (среды) и асфальтенов (фазы). В случае неустойчивости, системы стремятся к разделению фаз. Особенно эти процессы просматриваются при хранении, перекачке, компаундировании и нагреве. Так, например, в битумах с высоким содержанием асфальтенов и парафино-нафтеновых углеводородов при приготовлении ПБВ может наблюдаться расслоение продукта за счет выпадения асфальтеновой фазы.

Подобное поведение вяжущего демонстрирует целесообразность использования для приготовления ПБВ битумов с пенетрацией 130–200 и 200–300 мм⁻¹, в которых соотношение «мальтены – асфальтены» оптимальным в этом случае пластификация не требуется.

Однако ПНСТ 85 [6] и введенная им классификация битумных вяжущих по маркам PG (PerformanceGrade) затронули и само производство вяжущих, внося в него определенные коррективы. Особое внимание стоит уделить маркам PG 70/40 и PG 52/46, получение которых не представляется возможным без дополнительного введения пластифицирующего компонента. Таким образом, на сегодняшний день использование

пластификатора является эффективным инструментом в достижении заданных низкотемпературных параметров модифицированного вяжущего.

Целью работы было обоснование необходимости использования пластификатора при производстве ПБВ, маркируемого по PG.

В представленной работе рассматривалась серия из 6 различных пластификаторов, таблица 1, битум марки БНД 70/100 АО «Газпронефть МНПЗ», свойства представлены в таблице 2, и полимер SBS L 30- 01 А АО «Воронежсинтезкаучук». Выбор марки битума обоснован его представителем на рынке битумных материалов. Содержание пластификатора и полимера составляло $4,5 \pm 0,5$ % и $3,5 \pm 0,5$ % соответственно.

Таблица 1

Пластификаторы, используемые для приготовления ПБВ

№п/п	Наименование пластификатора
1	Пластификатор 1
2	Экстракт марки. А
3	Суперпластификатор
4	Масло и-20
5	Мазут
6	Мет фракция

Используемый битум соответствует требованиям [7] предъявляемым к марке БНД 70/100.

В основу определения верхнего (X) и нижнего (Y) значений марки вяжущего по PG положено:

– оценка сопротивления вяжущего сдвиговым нагрузкам путем приложения к образцу, подготовленному по методу RTFOT, знакопеременной синусоидальной сдвиговой нагрузке, с последующим определением комплексного модуля сдвига [8];

– оценка сопротивления вяжущего нагрузке при заданной отрицательной температуре, путем приложения сосредоточенной статической нагрузки на образец-балочку из органического вяжущего, подготовленного по методу PAV, с последующим определением показателей жёсткости и ползучести [9].

В ходе эксперимента, необходимо было, незначительно варьируя содержанием пластификатора, выйти на марку модифицированного вяжущего PG76/28. Диапазон варьирования содержанием пластификатора был принят $4,5 \pm 0,5$ %. Оценка приготовленных ПБВ с использованием различных пластификаторов выполнялась в соответствии с ПНСТ 85 [6]. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Физико-механические показатели битума БНД 70/100

Наименование показателей	Требования ГОСТ 33133	Фактические результаты
Глубина проникания иглы 0,1 мм, при 25 °С при 0 °С	71-100 >21	77 24
Растяжимость, см, при 25 °С при 0 °С	>62 >3,7	100 3,7
Максимальное усилие при растяжении, Н, при температуре, при 25 °С при 0 °С	– –	1,2 118
Температура размягчения °С ,	> 47	49,5
Температура хрупкости, °С	< -18	-22
Динамическая вязкость, Па·с, при 60 °С, Условие 1	–	245,5
Изменение динамической вязкости после сдвигового воздействия, Па·с, при 60 °С , Условие 2	–	12,97
Испытания после старения по методу RTFOT		
Изменение массы образца после старения, %	<0,6	0,2
Изменение температура размягчения ,°С , после старения	<7	6,2
Динамическая вязкость после старения, Па·с, при 60 °С , Условие 1	-	667,11
Изменение динамической вязкости после сдвигового воздействия, после старения Па·с , при 60 °С , Условие 2	-	24,72
Температура хрупкости после старения, °С	<-15	-19

Как видно из табл. 3 исходный битум классифицируется как PG58/28, вторая цифра в классификации – показатель жесткости на реометре с изгибом балки (BBR), характеризующий возможность сопротивления вяжущего растрескиванию при пониженной температуре. Введение полимера в его состав способствует переходу вяжущего в марку PG70/22, при этом наблюдается повышение верхнего предела вяжущего и проседание низкотемпературных характеристик, что объясняется недостатком мальтенов в битуме для пластификации полимера, и для большинства регионов РФ не допустимо. Более того, растворить весь полимер в битуме без пластификатора, без

изменения времени и температуры перемешивания состава, не представилось возможным. Исключение из состава полимерно-битумного вяжущего пластифицирующего компонента значительно увеличивает динамическую вязкость системы при температурах 135 °C и 165 °C, комплексный модуль сдвига до и после старения, что придает ПБВ очень высокую вязкость при перекачке вяжущего по системе трубопроводов, перемешивании с минеральной частью асфальтобетонных смесей и усложняет выполнение технологических операций на дорожно-строительных объектах, отрицательно влияя на удобоукладываемость и уплотняемость полимер-асфальтобетонов на его основе [10, 11].

Таблица 3

Показатели свойств вяжущего по PG

Наименование пластификатора при приготовлении ПБВ (номер состава)	Динамическая вязкость, Па·с		Комплексный модуль сдвига до старения, °С	Изм. массы, %	Комплексный модуль сдвига после старения RTFOT, °С	Жесткость на реометре с изгибом балки (BBR)						Марка вяжущего
	135 °С	165 °С				-12 °С		-18 °С		-24 °С		
						жесткость МПа	ползучесть	жесткость МПа	ползучесть	Жесткость МПа	ползучесть	
Пластификатор 1 (1)	1,817	0,474	80,5	0,26	78,6	–	–	124,63	0,323	248,42	0,299	76/28
Экстракт марки А (2)	1,866	0,423	81,2	0,30	80,4	–	–	125,49	0,327	242,55	0,298	76/28
Суперпластификатор (3)	1,508	0,362	78,1	0,83	70,1	–	–	118,62	0,305	263,74	0,257	70/28
Масло индустриальное (4)	1,653	0,391	77,1	0,81	73,1	–	–	116,85	0,302	246,64	0,267	70/28
Мазут (5)	1,954	0,545	83,6	0,36	80,9	–	–	136,54	0,315	258,87	0,285	76/28
Мет фракция (6)	2,152	0,653	84,8	0,21	81,8	–	–	131,14	0,314	261,49	0,285	76/28
БНД 70/100 (7)	0,389	0,106	65,1	0,38	62,5	–	–	166,45	0,304	325,83	0,265	58/28
Без пластификатора (8)	2,798	0,878	86,8	0,24	71,4	148,18	0,339	133,50	0,289	–	–	70/22

Примечание* Марка вяжущего определяется согласно столбцу 6 (верхний предел) и столбцам 7–10 (нижний предел) по ПНСТ 86 «Порядок определения марки с учетом температурного диапазона эксплуатации»

Обогащение битума углеводородами, посредством введения пластификатора, напротив, позволяет значительно расширить низкотемпературный диапазон работы вяжущего и достичь необходимого показателя модуля сдвига в достаточно высоком диапазоне температур.

Однако, не каждый пластифицирующей компонент позволяет получить вяжущее, характеризующееся совокупностью желаемых (проектируемых) свойств. При детальном рассмотрении данных табл. 3 становится очевидным, что образцы ПБВ с применением пластификаторов

№ 5 и 6 достаточно жесткие и находятся на границе марки.

Для доказательного обоснования необходимости использования пластификаторов при производстве ПБВ были рассчитаны основные параметры качества вяжущего, регламентируемые [9]. В соответствии с используемой методикой, необходимо оценить эффективность каждого состава, выполненного с использованием различных пластификаторов, табл. 3. В основу оценки положен расчет частных критериев эффективности, рассчитывающихся по формуле:

$$K_{\text{эф}}^i = \frac{Z_{\text{пок}}^i}{Z_{\text{нст}}^i}, \quad (1)$$

где $K_{\text{эф}}^i$ — частный критерий эффективности i -го показателя; $Z_{\text{пок}}^i$ — фактическое значение i -го показателя; $Z_{\text{нст}}^i$ — требуемое значение i -го показателя.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

На основании полученной базы частных критериев эффективности для ПБВ, приготовленных с использованием пластификаторов (со-

ставы 1–6) и без (состав 8), а также исходного битума (состав 7) был рассчитан для каждого состава обобщенный критерий эффективности.

$$K_{\text{эф}}^{\text{об.}} = \sqrt[6]{N_{n=1}^i \cdot K_{\text{эф}}^i}, \quad (2)$$

Результаты расчета обобщенных критериев эффективности для составов ПБВ, приготовленных с использованием пластификаторов и без представлены в виде диаграммы на рис. 1.

Таблица 4

Частные критерии эффективности для ПБВ

Вязущее		Критерии эффективности			
		комплексного модуля сдвига до старения	жесткости по BBR	комплексного модуля сдвига после старения на RTFOT	пластичности
состав вяжущего	№ состава				
Битум + Пластификатор 1	1	1,06	1,21	1,03	0,98
Битум + Экстракт марки А	2	1,07	1,21	1,06	0,99
Битум + Суперпластификатор	3	1,03	1,02	0,92	0,93
Битум + Масло промышленное	4	1,01	1,01	0,96	0,96
Битум + Мазут	5	1,10	1,11	1,06	0,98
Битум + Мет фракция	6	1,12	1,10	1,08	0,97
БНД 70/100	7	0,86	1,02	0,82	0,97
Битум без пластификатора	8	1,01	0,95	0,94	0,95

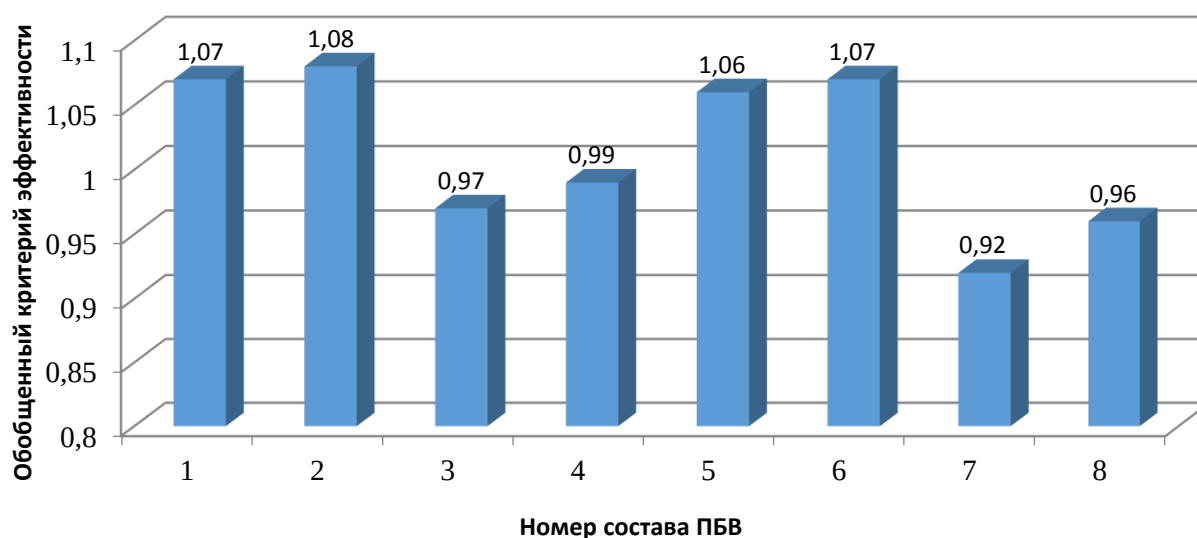


Рис. 1. Обобщенные критерии эффективности составов ПБВ

Комплексная оценка влияния пластификатора на свойства конечного продукта – ПБВ, выполненная на основании анализа обобщенных критериев эффективности, демонстрирует необходимость использования пластифицирующих компонентов, для достижения требуемых показателей свойств модифицированного вяжущего.

Вывод. Таким образом, наличие пластифицирующих компонентов в вяжущем – не только важное, но и необходимое условие получения качественного ПБВ [14, 15]. Однако необходима разработка параметров эффективности пластификаторов и методики их оценки, позволяющих прогнозировать работу и долговечность композиции. Также, варьируя только содержанием пластификатора, становится возможным корректировать нижний предел марки по PG для использования в регионах с низкими зимними температурами. При этом увеличение высокотемпературных параметров, в случае необходимости, становится возможным за счет увеличения содержания полимера.

Более того, введение пластификатора позволяет ускорить процесс приготовления ПБВ, обеспечить щадящий температурный режим его приготовления (не выше 160 °C), а также существенно повысить эффективность вводимого полимера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Парфенова Е.В. Получение дорожных полимерно-битумных вяжущих с улучшенной стойкостью против старения на базе компаундированной битумной основы и модификатора «Elvaloy 4170 RET» // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 378–383.
2. Дошлов О.И., Спешиллов Е.Г. Полимерно-битумное вяжущее – высокотехнологическая основа для асфальта нового поколения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №6. С. 140.
3. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Изд-во АСВ, 2014. 180 с.
4. Золотарев В.А. Битумы, модифицированные полимерами и добавками. Избранные труды. Том 2. СПб.: Славутич, 2013. 149 с.
5. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие: учебник для студентов высших учебных заведений. Х.: ХНАДУ, 2014. 180 с.
6. ПНСТ 86 Порядок определения марки с учетом температурного диапазона эксплуатации. Введ. с 10.03.2016. Москва: изд-во стандартов, 2016. 8 с.
7. ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вяжущие. Технические требования (с Поправкой). введ. 01.10.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
8. ПНСТ 87 Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR) Введ. с 10.03.2016. Москва: Изд-во стандартов, 2016. 11 с.
9. ПНСТ 79 «Метод определения жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах с помощью реометра, изгибающего балочку (BBR)». Введ. с 10.03.2016. Москва: Изд-во стандартов, 2016. 12 с.
10. McNally T. Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterization. U.K.: Woodhead Publishing Limited. 2011. 424 p.
11. Airey G.D. Factors affecting the rheology of polymer modified bitumen. Polymer Modified bitumen. Woodhead Publishing Cambridge, UK, 2011.
12. Галдина В.Д. Кинетика термоокислительного старения битумов различной природы // Вестник ТТГАСУ. 2011. № 3. С. 133–139.
13. Аюпов Д.А., Хакимуллин Ю.Н., Макаров Д.Б. Теоретические аспекты расслаиваемости битумо-полимерных вяжущих // Вестник технологического университета. 2016. №.19. №23.
14. Блажеёвский К., Печаковский Х. Битумный справочник. Польша 2014. 142 с.
15. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Влияние вида пластификатора на свойства битума и полимерно-битумных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №1. С. 26–31.

Информация об авторах

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

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

Литовченко Дмитрий Павлович, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: litov4enko.dmitrij@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Барковский Дмитрий Владиславович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: aerodorstroy@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ширяев Артем Олегович, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: shiryaev.ao@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в марте 2019 г.

© Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Литовченко Д.П., Барковский Д.В., Ширяев А.О., 2019

^{1,*}Vysotskaya M.A., ¹Kuznetsov D.A., ¹Litovchenko D.P., ¹Barkovsky D.V., ¹Shiriaev A.O.

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: roruri@rambler.ru

THE NEED FOR A PLASTICIZER IN THE PRODUCTION OF POLYMERIC-BITUMEN BINDERS

Abstract. The popularity of asphalt mixes on a polymer-bitumen binder is caused by the desire to ensure the operational reliability of road pavements due to the axle load of vehicle and the intensity of traffic. In addition, the use of an appropriate type of binder has become an important direction in ensuring the operational reliability of asphalt concrete pavements, suitable for the specific conditions of the region, marked with PG. The provision of required set of properties of the polymer-bitumen binder largely depends on the percentage of the polymer and on the type of plasticizer used. The article presents the results of comparative tests of polymer-bitumen binders with the use of six different plasticizing agents. The dependence of changes in the indicators of modified binders and their thermal stability is investigated. Recommendations are given to maintain the required level of physical and mechanical parameters of polymer-bitumen binder.

Keywords: polymer-bitumen binder, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Shirkunov A.S., Ryabov V.G., Parfenova E.V. Getting road polymer-bitumen binders with improved resistance to aging on the basis of compounded bitumen base and modifier "Elvaloy 4170 RET" [Poluchenie dorozhnyh polimerno-bitumnyh vyazhushchih s uluchshennoj stojkost'yu protiv stareniya na baze kompaundirovannoj bitumnoj osnovy i modifikatora «Elvaloy 4170 RET»]. Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. 2012. No. 5. Pp. 378–383. (rus)
2. Doshlov O.I., Speshilov E.G. Polymer-bitumen binder – a high-tech basis for asphalt of a new generation [Polimerno-bitumnoe vyazhushchee – vysokotekhnologicheskaya osnova dlya asfal'ta novogo pokoleniya]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. No. 6. Pp. 140. (rus)
3. Zolotarev V.A. Road bitumen binders: a textbook for university students [Dorozhnye bitumnye vyazhushchie: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij]. M.: Publishing house DIA, 2014. 180 p. (rus)
4. Zolotarev V.A. Bitumens modified with polymers and additives [Bitumy, modifitsirovannye polimerami i dobavkami]. Selected Works. Volume 2 SPb.: Slavutich, 2013. 149 p. (rus)
5. Zolotarev V.A. Road bitumen binders [Dorozhnye bitumnye vyazhushchie]: a textbook for university students. Kh.: KhNADU. 2014. 180 p. (rus)
6. PNST 86 The procedure for determining the brand, taking into account the temperature range of operation [Poryadok opredeleniya marki s uchetom temperaturnogo diapazona ehkspluatsii]. Enter from 10.03.2016. Moscow: publishing house of standards. 2016. 8 p. (rus)
7. GOST 33133-2014 Public roads. Bitumens oil road viscous [Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Bitumy neftyanye dorozhnye vyazkie]. Technical requirements (with amendment). Enter 10/01/2015. M.: Standardinform, 2015. 11 p. (rus)
8. PNST 87 Method for Determining Properties Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) [Metod opredeleniya svoystv s ispol'zovaniem dinamicheskogo sdvigovogo reometra]. Int. from 10.03.2016. Moscow: Publishing house of standards, 2016. 11 p. (rus)
9. PNST 79. Method for determining the stiffness and creep of bitumen at low temperatures using a beam bending rheometer (BBR) [Metod opredeleniya zhestkosti i polzuchesti bituma pri otricatel'nyh temperaturah s pomoshch'yu reometra, izgibayushchego balochku (BBR)]. Enter from 10.03.2016.

Moscow: standards publishing house, 2016. 12 p. (rus)

10. McNally T. Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterization. U.K.: Woodhead Publishing Limited. 2011. 424 p.

11. Airey G.D. Factors affecting the rheology of modified bitumen. Polymer Modified bitumen. Woodhead Publishing Cambridge, UK, 2011.

12. Galdina V.D. Kinetics of thermo-oxidative aging of bitumens of various nature [*Kinetika termookislitel'nogo stareniya bitumov razlichnoj prirody*]. Vestnik TTGASU. 2011. No. 3. Pp. 133–139. (rus)

13. Ayupov D.A., Khakimullin Yu.N., Makarov D.B. Theoretical aspects of the separation of bitumen-polymer binders [*Vliyanie vida plastifikatora*

na svojstva bituma i polimerno-bitumnyh vyazhushchih]. Bulletin of the Technological University. 2016. No. 19. No. 23. (rus)

14. Blazheyevsky K., Pechakovsky H. Bituminous handbook [*Bitumnyj spravochnik*]. Poland 2014. 142 p. (rus)

15. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. The influence of the type of plasticizer on the properties of bitumen and polymer-bitumen binders [*Vliyanie vida plastifikatora na svojstva bituma i polimerno-bitumnyh vyazhushchih*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 1. Pp. 26–31. (rus)

Information about the authors

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

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

Litovchenko, Dmitry P. Master student. E-mail: litov4enko.dmitrij@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Shiriaev, Artem O. Master student. E-mail: shiryaev.ao@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in March 2019

Для цитирования:

Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Литовченко Д.П., Барковский Д.В., Ширяев А.О. Пластификатор при производстве полимерно-битумных вяжущих – как необходимость // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 16–22. DOI: 10.34031/article_5cd6df466bb9e0.32764094

For citation:

Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Litovchenko D.P., Barkovsky D.V., Shiriaev A.O. The need for a plasticizer in the production of polymeric-bitumen binders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 16–22. DOI: 10.34031/article_5cd6df466bb9e0.32764094

DOI: 10.34031/article_5ce292c95984b4.27808276

^{1,*}Логанина В.И., ¹Кислицына С.Н., ¹Сергеева К.А.¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28

*E-mail: loganin@mail.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

Аннотация. Приведены сведения о составе антиобледенительного покрытия. Рассмотрено использование в качестве связующего акриловой смолы А-01 и DEGALAN®, высокохлорированной полиэтиленовой смолы НСРЕ и силиконовой смолы SILRES® MSE 100. Выявлены закономерности изменения вязкости состава в зависимости от объемного содержания наполнителя – аэросила марки R 972. Установлено, что при наполнении в интервале $0 < \varphi < 0,012$ увеличение вязкости незначительно. При дальнейшем наполнении ($\varphi > 0,012$) происходит значительное изменение соотношения объемной и пленочной фаз матрицы, наблюдается резкое повышение вязкости состава. Для каждого вида смолы установлено оптимальное объемное содержание наполнителя. Выявлено, что взаимодействие в системе наполнитель-наполнитель преобладает над взаимодействием в системе наполнитель-связующее. При оценке гидрофобных свойств установлено, что покрытия имеют высокий краевой угол смачивания (более 150°), и угол скатывания не превышает 10°, что подтверждает наличие супергидрофобности и предполагает антиобледенительные свойства у покрытий. Адгезия покрытия к подложке, оцененная методом решетчатого надреза, на растворной и металлической подложках составила 1 балл. При 4-кратном увеличении отмечены ровные и четкие значения надрезов без сколов и крошения.

Ключевые слова: покрытие, супергидрофобность, краевой угол смачивания, угол скатывания.

Введение. Проблема обледенения проводов ЛЭП, контактных сетей железнодорожного и городского электротранспорта, крыш жилых и общественных зданий, несмотря на предложения в научно-технической и патентной литературе, является в настоящее время актуальной. Образование льда на внешних поверхностях, таких как крыши зданий, провода приносит большие экономические потери и риски для безопасности. Применение антиобледенительной композиции позволяет снизить энергетические затраты на его удаление, продлить срок службы защищенных поверхностей и уменьшить ежегодные расходы на эксплуатацию [1–5].

Лед легко образуется в окружающей среде с температурой $< 5^\circ\text{C}$ и влажностью $> 50\%$. Способность конденсата легко скатываться с поверхности зависит от силы взаимодействия между каплями и поверхностью подложки. Механизм антиобледенительного действия непосредственно связан с гидрофобностью поверхностного слоя, которая регулируется поверхностной энергией, и поверхностной структурой [6–8].

К антиобледенительным покрытиям определены следующие требования:

- высокая адгезия к защищаемым материалам;
- низкая адгезия льда к покрытию;
- краевой угол смачивания водой не ниже 150° ;
- угол скатывания воды с покрытия не более 10° .

Методика исследования. В работе были использованы следующие виды смол: акриловая смола А-01, акриловая смола DEGALAN®, высокохлорированная полиэтиленовая смола НСРЕ и кремнийорганическая смола. В качестве наполнителя применяли аэросил марки R 972 с плотностью $\rho = 2360 \text{ кг/м}^3$, размерами частиц 16 нм и удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 12000 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Степень гидрофобности оценивали по величине краевого угла смачивания (θ°) и углу скатывания капли воды с покрытия (φ_0).

Оптимальное содержание наполнителя было рассчитано двумя методами. В первом случае расход наполнителя рассчитывался по следующим формулам:

$$V_n = \frac{1}{\alpha}, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{нас}}}{\alpha \cdot \rho_{\text{ист}}}, \quad (2)$$

где V_n – объем частиц наполнителя, ед. об.; α – коэффициент раздвижки частиц наполнителя; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность наполнителя, кг/м^3 ; $\rho_{\text{ист}}$ – истинная плотность наполнителя, кг/м^3 ; φ – объемное содержание наполнителя.

Коэффициент раздвижки частиц наполнителя определялся по формуле:

$$\alpha = \left(\frac{d+h}{d} \right)^3, \quad (3)$$

где d – средний размер частиц наполнителя, м; h – средняя толщина прослойки пленкообразователя, м, принималась равной $h=(0,14\pm 0,01)D$.

У аэросила R 972 плотностью $\rho=2360$ кг/м³, размерами частиц 16 нм $h = 2,4$ нм или 0,0024 мкм.

Вторым методом расчет производился по формуле:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}} \left(\frac{h S_{\text{уд}} \rho_{\text{ист}}}{6} + 1 \right)^3}, \quad (4)$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность наполнителя.

Удельная поверхность определялась с помощью прибора ПСХ-12.

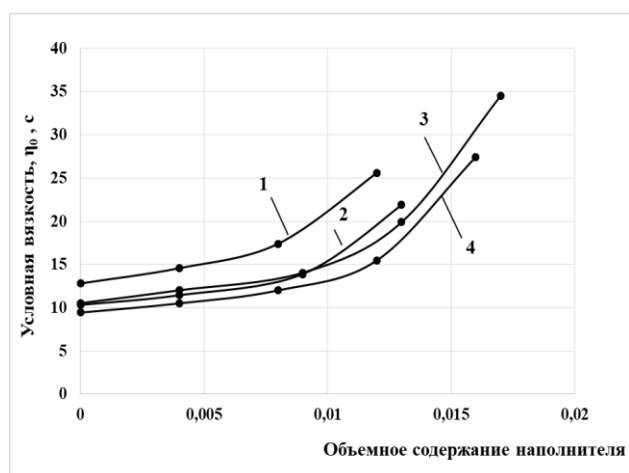


Рис. 1. Зависимость относительной вязкости от объемной концентрации наполнителя

- 1 – акриловая смола A01;
2 – силиконовая смола SILRES® MSE 100;
3 – высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE; 4 – акриловая смола DEGALAN

На рис. 2 представлена зависимость вязкости от объемной доли наполнителя в координатах $\lg \eta - C$ (где C – концентрация наполнителя в системе). Эта зависимость представляет собой две пересекающиеся прямые. Точка пересечения, спроецированная на ось абсцисс, будет представлять собой критическую объемную концентрацию наполнителя (КОКП). Наличие точки перегиба на кривой зависимости $\lg \eta = f(C)$ свидетельствует о том, что взаимодействие в системе наполнитель-наполнитель преобладает над взаимодействием в системе наполнитель-связующее.

Установлено, что оптимальное содержание наполнителя аэросила R 972 плотностью $\rho_f=2360$ кг/м³, насыпной плотностью $\rho_n=50$ кг/м³, удельной поверхностью $S_u=12000$ м²/кг для акриловой смолы A-01, высокохлорированной полиэтиленовой смолы HCPE составляет $V=0,008$, для силиконовой смолы SILRES® MSE 100–0,009,

Результаты исследований. На рис. 1 представлена зависимость относительной вязкости от объемной концентрации наполнителя. Как видно из полученных данных, при наполнении в интервале примерно $0 < \varphi < 0,012$ увеличение вязкости незначительно, полимерная матрица лишь частично переходит в пленочное состояние. При малой концентрации наполнителя граничные слои удаленных друг от друга частиц не представляют собой выделенной в объеме материала самостоятельной фазы, способной оказывать влияние на его свойства.

При дальнейшем наполнении ($\varphi > 0,012$) происходит значительное изменение соотношения объемной и пленочной фаз матрицы, наблюдается резкое повышение вязкости состава.

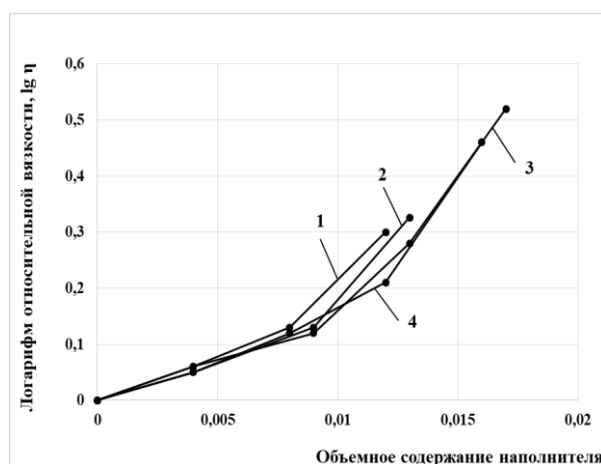


Рис. 2. Зависимость вязкости от объемной доли наполнителя в координатах $\lg \eta - C$

- 1 – акриловая смола A-01; 2 – силиконовая смола SILRES® MSE 100; 3 – высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE; 4 – акриловая смола DEGALAN

для акриловой смолы DEGALAN – 0,012, что согласуется с полученными расчетными данными

Полученные растворы были нанесены на растворные подложки. При оценке гидрофобных свойств установлено, что покрытия имеют высокий краевой угол смачивания (более 150°), и угол скатывания не превышает 10° (см. табл.1), что подтверждает наличие супергидрофобности и предполагает антиобледенительные свойства у покрытий. Результаты проведенных исследований показывают, что гидрофобные свойства покрытий на металлической подложке проявляются в большей степени, чем на растворной подложке.

Рельеф поверхности покрытия, сформированный с помощью аэросила R-972, который имеет поверхностные гидрофобные метильные группы, позволило увеличить значение краевого угла смачивания свыше 150° (табл. 1). Гидрофобный слой понижает поверхностное натяжение

покрытия, препятствуя растеканию капли воды (рис. 3). Созданная за счет сформированной высокоразвитой морфологии структуры шероховатость поверхности покрытия уменьшает площадь

контакта из-за присутствия воздушных зазоров между каплями воды и гидрофобизированной поверхностью и, как следствие, снижает адгезионные силы.

Таблица 1

Значение краевого угла смачивания на антиобледенительном покрытии на основе различных смол

Покрытие на основе смолы	Угол смачивания (θ°), град		Угол скатывания, (ϕ°), град	
	на растворной подложке	на металлической подложке	на растворной подложке	на металлической подложке
Высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE	151	170	16	9,6
Акриловая А-01	151	175	15	9,6
Акриловая смола DEGALAN®	152	154	16	10
Силиконовая смола SILRES® MSE 100	152	176	9,6	5



Рис. 3. Капля воды на поверхности антиобледенительного покрытия на основе акриловой смолы А-01

Адгезия покрытия к подложке оценивалась методом решетчатого надреза и составила 1 балл. При 4-кратном увеличении отмечены ровные и четкие значения надрезов без сколов и крошения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилова О.А., Проскурина О.И., Антипов В.Н., Хамова Т.В., Есипова Н.Е., Пугачев К.Э., Ладилина Е.Ю., Кручинина И.Ю. Золь-гель синтез и гидрофобные свойства антифрикционных покрытий для использования в высокооборотных минитурбогенераторах // Физика и химия стекла. 2014. Т. 40. № 3. С. 419–425.

Информация об авторах

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

Кислицына Светлана Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов и деревообработки. E-mail: kislitsyna_sn@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г.Титова, д. 28.

2. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 7. С. 619–638.

3. Lakshmi R.V., Bharathidasan T. Fabrication of superhydrophobic and oleophobic sol-gel nanocomposite coating // Surface & Coatings Technology. 2011. Vol. 257. No. 24. P. 7.

4. Nosonovsky M., Bhushan B. Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering // Current Opinions Coll. Interface Sci. 2009. No. 14. Pp. 270–280.

5. Shirtcliffe N.J., McHale G., Newton M.I., Perry C.C. Intrinsically Superhydrophobic Organosilica Sol-Gel Foams // Langmuir. 2003. Vol. 19. No. 14. Pp. 5626–5631.

6. Venkateswara Rao A., Lathe S.S., Nadargi D.Y., Hirashima H., Ganesan V. Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method // J. Colloid Interf. Sci. 2000. Vol. 332. No 2. Pp. 484–490.

7. Thorpe A.A., Smith J.R., Peters V. Poly(methylpropenoxyfluoroalkylsiloxane)s: a class of fluoropolymers capable of inhibiting bacterial adhesion onto surfaces // J. Fluor. Chem. 2000. No. 104. P. 37–45.

8. Кожухова М.И., Флорес-Вивиан И., Рао С., Строкова В.В., Соболев К. Г. Комплексное силосановое покрытие для гидрофобизации бетонных поверхностей // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 26–30.

Сергеева Кристина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и химии. E-mail: kleopatra0100@rambler.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г.Титова, д. 28.

Поступила в январе 2019 г.

© Логанина В.И., Кислицына С.Н., Сергеева К.А., 2019

^{1,*}**Loganina V.I., ¹Kislitsyna S.N., ¹Sergeev K.A.**

¹*Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, d. 28*

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

DEVELOPMENT OF ANTI-ICING COATING

Abstract. The information about the composition of the anti-icing coating is provided. The use of acrylic resin A-01 and DEGALAN®, highly chlorinated polyethylene resin HCPE and silicone resin SILRES® MSE 100 as a binder is considered. The regularities of changes in viscosity of the composition depending on volume content of the filler – Aerosil brand R 972 are revealed. It is found that the viscosity increase is insignificant when filling in the range $0 < \varphi < 0.012$. With further filling ($\varphi > 0.012$) there is a significant change in the ratio of the volume and membranous phases of the matrix, there is a sharp increase in the viscosity of the composition. The optimal volumetric composition of the filler is established for each type of the resin. It is revealed that the interaction in the filler-filler system prevails over the interaction in the filler-binder system. In assessing the hydrophobic properties, it is found that the coatings have a high contact angle (more than 150°), and the roll-off angle does not exceed 10° , which confirms the presence of superhydrophobicity and assumes anti-icing properties of the coatings. The adhesion of the coating to the substrate estimated by the lattice incision method on the mortar and metal substrates is 1 point. Smooth and clear cuts without chipping and cracking are marked at 4x magnification.

Keywords: coating, superhydrophobicity, edge of contact angle, roll-off angle.

REFERENCES

1. Shilova O.A., Proskurina O.I., Antipov V.N., Khamova T.V., Esipova N.E., Pugachev K.E., Ladilina E.Yu., Kruchinina I.Yu. Sol-gel synthesis and hydrophobic properties of anti-friction coatings for use in high-speed mini-turbine generators [Zol'-gel' sintez i gidrofobnye svoystva antifrikcionnykh pokrytij dlya ispol'zovaniya v vysokooborotnykh mini-turbogeneratorah]. Physics and Chemistry of Glass. 2014. Vol. 40. No. 3. Pp. 419–425. (rus)
2. Boynovich L.B., Emelianenko A.M. Hydrophobic materials and coatings: principles of creation, properties and application [Gidrofobnye materialy i pokrytiya: principy sozdaniya, svoystva i primeneniye]. Chemistry Advances. 2008. Vol. 77. № 7. Pp. 619–638. (rus)
3. Lakshmi R.V., Bharathidasan T. Fabrication of superhydrophobic and oleophobic sol – gel nanocomposite coating. Surface & Coatings Technology. 2011. No. 24. Vol. 257. P. 7.
4. Nosonovsky M., Bhushan B. Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering. Current Opinions Coll. Interface Sci. 2009. No. 14. Pp. 270–280.
5. Shirtcliffe N.J., McHale G., Newton M.I., Perry C.C. Intrinsically Superhydrophobic Organosilica Sol-Gel Foams. Langmuir. 2003. Vol. 19. No. 14. Pp. 5626–5631.
6. Venkateswara Rao A., Latthe S.S., Na-dargi D.Y., Hirashima H., Ganesan V. Preparation of the MTMS-based superhydrophobic silica films by sol-gel method. J. Colloid Interf. Sci. 2000. Vol. 332. No. 2. Pp. 484–490.
7. Thorpe A.A., Smith J.R., Peters V. Poly (methylpropenoxyfluoroalkylsiloxane)s: a class of fluoropolymers capable of inhibiting bacterial adhesion on surfaces. J. Fluor. Chem, 2000. No. 104. Pp. 37–45.
8. Kozhukhova M.I., Flores-Vivian I., Rao S., Strokova V.V., Sobolev K.G. Complex siloxane coating for hydrophobization of concrete surfaces [Kompleksnoe siloksanovoe pokrytie dlya gidrofobizatsii betonnykh poverkhnostej]. Construction materials. 2014. No. 3. Pp. 26–30. (rus)

Information about the authors

Loganina, Valentina I. DSc, Professor. E-mail: loganin@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, d. 28.

Kislitsyna, Svetlana N. PhD, Associate Professor. E-mail: kislitsyna_sn@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, d. 28.

Sergeeva, Kristina A. PhD, Associate Professor. E-mail: kleopatra0100@rambler.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, d. 28.

Received in January 2019

Для цитирования:

Логанина В.И., Кислицына С.Н., Сергеева К.А. Разработка состава антиобледенительного покрытия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 23–27. DOI: 10.34031/article_5ce292c95984b4.27808276

For citation:

Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Sergeeva K.A. Development of anti-icing coating. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 23–27. DOI: 10.34031/article_5ce292c95984b4.27808276

DOI: 10.34031/article_5ce292c9837090.54164650

^{1,*}Сулейманова Л.А., ¹Кочерженко А.В., ¹Рябчевский И.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

*E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ВСПЕНИВАНИЯ ОТ СРЕДНЕГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ПЕНОПОЛИУРЕТАНА

Аннотация. В настоящее время в России все большее значение уделяется актуальным вопросам энергосбережения и энергетической эффективности при строительстве. Действующие нормативно-правовые акты требуют решения вопросов, связанных с повышением энергоэффективности зданий. Одним из направлений решения поставленных задач является разработка и изготовление новых видов эффективных теплоизоляционных материалов. В данной работе рассматривается использование промышленных отходов горно-обогатительных комбинатов как наполнитель пенополиуретана. В качестве исследуемого сырья были взяты пробы с поля фильтрации хвостов Стойленского ГОКа из различных участков, определены их гранулометрические и химические составы, а также определены гармонические диаметры частиц наполнителя. По результатам расчета определена зависимость коэффициента вспенивания от среднего гармонического диаметра наполнителя. Разработана матрица планирования эксперимента, по результатам которой были построены математические модели зависимости коэффициента вспенивания лабораторных проб пенополиуретана, наполненного хвостами. Рассмотрены три зоны хвостов по результатам отбора проб. Анализируя полученные результаты, выведена количественная и качественная оценка влияния каждого фактора в отдельности, а также их совокупности на изменение системы «состав – свойства».

Ключевые слова: пенополиуретан, наполнитель, математическое моделирование, коэффициент вспенивания, отходы горнорудной промышленности, гармонический диаметр.

В данной статье впервые предложен вариант наполнения пенополиуретана промышленными отходами горно-обогатительных комбинатов, а

конкретно – отходами мокрой сепарации железистых кварцитов (далее хвосты) [1–6]. Схема поля фильтрации хвостов представлена на рис. 1, 2.

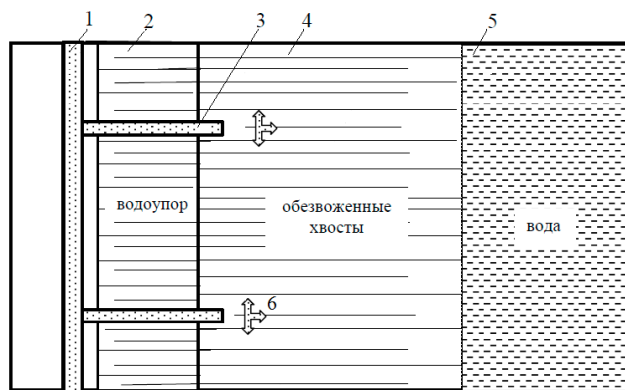


Рис. 1. Схема поля фильтрации хвостов: 1 – магистральный пульпопровод; 2 – дамба из водоупора; 3 – распределительный трубопровод; 4 – основное поле фильтрации; 5 – участок отложения иловых остатков хвостов; 6 – направления растекания пульпы

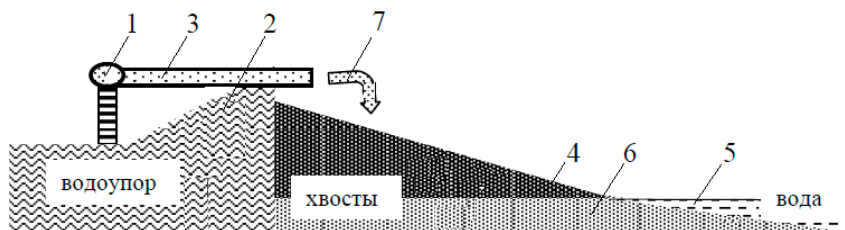


Рис. 2. Схема поля фильтрации хвостов в разрезе: 1 – магистральный пульпопровод; 2 – дамба из водоупора; 3 – распределительный трубопровод; 4 – основное поле фильтрации; 5 – участок отложения иловых остатков хвостов; 6 – хвосты, расположенные в воде; 7 – направления растекания пульпы

После отбора образцов с полей фильтрации хвостов определялся их химический (табл. 1) и гранулометрический (табл. 2) составы.

Таблица 1

Химический состав образцов материала

№ образца		Химический состав, %							
		SiO ₂	Fe общ.	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Ост.
Зона 1	1	66,3	12,2	9,1	5,6	2,3	2,5	0,8	1,2
	2	65,4	11,8	9,5	5,9	2,6	2,8	0,5	1,5
	3	66,8	12,6	9,7	4,8	2,1	2,1	0,48	1,42
	4	66,3	13,1	8,6	4,9	2,9	2,8	0,53	1,07
	5	65,8	12,8	9,4	5,2	2,5	2,3	0,59	1,4
Среднее значение		66,12	12,5	9,26	5,28	2,48	2,5	0,58	1,318
Зона 2	6	67,7	10,8	10,3	5,3	1,8	1,6	0,9	1,6
	7	68,3	10,3	11,5	4,4	1,7	1,9	1,2	0,7
	8	66,9	11,1	10,8	5,6	2,1	1,7	0,7	1,1
	9	68,1	10,8	11,3	4,7	1,5	2,1	0,8	0,7
	10	66,8	11,2	10,9	5,1	1,9	1,8	1,1	1,2
Среднее значение		67,56	10,84	10,96	5,02	1,8	1,82	0,94	1,06
Зона 3	11	68,7	9,6	12,2	5,1	1,3	1,2	1,2	0,7
	12	69,3	8,1	12,1	4,8	1,8	1,5	1,3	1,1
	13	67,8	9,3	12,8	4,5	1,5	1,3	0,9	1,9
	14	69,7	9,1	11,1	4,2	1,9	1,8	1,4	0,8
	15	68,7	8,8	12,1	4,8	1,7	1,7	1,1	1,1
Среднее значение		68,84	8,98	12,06	4,68	1,64	1,5	1,18	1,12

Проведенные исследования показали, что по своему химическому составу образцы не имеют значительных отличий (табл. 1), но по гранулометрическому составу они отличаются (табл. 2). При воздействии гидравлической энергии водного потока происходит фракционирование частиц хвостов и их дифференциация по крупности и удельной массе различных минералов [7–11]. Самые крупные и тяжелые частицы выпадают вблизи места выпуска пульпы и формируют на хвостохранилищах так называемую зону слива или выпуска пульпы. Эта зона распространяется

примерно на 50 м. от места сброса (зона 1). Средние по размерам и удельной массе частицы формируют промежуточные зоны общей шириной 120–170 м (зоны 2 и 3). Самые мелкие и легкие частицы сносятся в крайнюю зону покрываются водой и в последствии образуют так называемые иловые осадки (зона 4). Схема расположения участков хвостов в зависимости от их гранулометрического состава приведена на рис.3. Такая структура расположения хвостов остается после завершения намыва поля фильтрации.

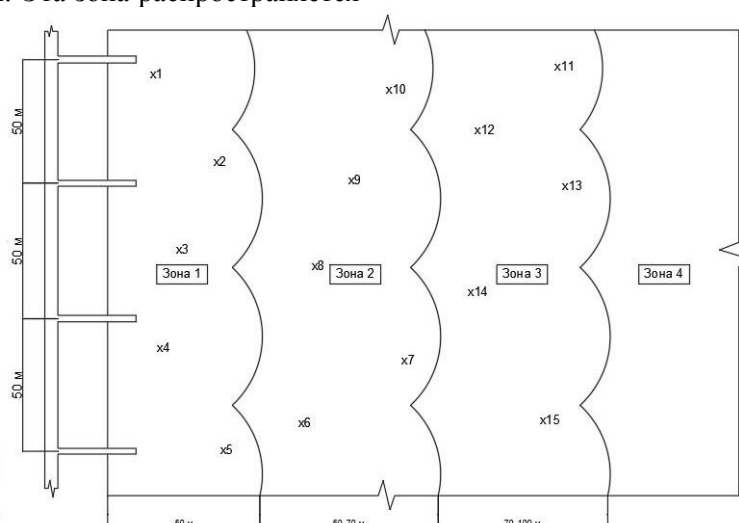


Рис. 3. Схема расположения участков хвостов в зависимости от их гранулометрического состава (отбор проб материала по зонам)

Таблица 2

Гранулометрический состав лабораторных проб материала

№ Образца		Содержание фракций, %, при крупности фракций, мм				
		1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Зона 1	1	18,5	28,6	39,3	8,8	4,8
	2	21,3	28,7	36,2	10,5	3,3
	3	20,7	27,4	38,8	9,4	3,7
	4	22,4	29,3	37,2	8,3	2,8
	5	20,3	26,7	40,5	9,3	3,2
Среднее значение		20,64	28,14	38,4	9,26	3,56
Зона 2	6	10,6	18,3	47,1	14,4	9,6
	7	8,1	19,6	47,8	13,7	10,8
	8	9,9	18,8	46,1	12,4	12,8
	9	9,2	20,1	48,2	13,3	9,2
	10	8,3	18,9	46,8	13,5	12,4
Среднее значение		9,22	19,14	47,2	13,46	10,96
Зона 3	11	4,1	9,7	53,6	16,4	16,2
	12	3,8	8,6	56,1	15,2	16,3
	13	4,7	7,8	55,8	17,1	14,6
	14	5,1	8,4	56,2	18,2	12,1
	15	3,4	8,1	54,6	16,6	17,3
Среднее значение		4,22	8,52	55,26	16,7	15,3

Для дальнейших исследований рассчитывался показатель, характеризующий дисперсность хвостов одним числом – гармоническим диаметром [12–14]. Гармонический диаметр представляет собой диаметр частиц некоторого однородного грунта, имеющего те же свойства, что и данный разнородный грунт. Если предположить, что грунт состоит из n одинаковых шарообразных частиц с диаметром, который мы обозначим Dr , то поверхность скелета будет равна [15–17]:

$$Fc = n\pi D_r^2; \quad (1)$$

а вес

$$gc = n \frac{\pi}{6} D_r^3 \gamma_y; \quad (2)$$

где γ_y – удельный вес скелета грунта.

Рассмотрим теперь грунт, состоящий из смеси n_1 частиц с диаметром D_{r1} , n_2 частиц с диаметром D_{r2} и так далее. Тогда их общая поверхность F и вес g будут соответственно равны:

$$F = \pi \sum n_i D_{ri}^2; \quad (3)$$

$$g = \frac{\pi \gamma_y}{6} \sum n_i D_{ri}^3. \quad (4)$$

Вес каждой i -й группы из n_i частиц равен:

$$g_i = n_i \frac{\pi}{6} D_{ri}^3 \gamma_y. \quad (5)$$

Если вес пробы грунта принять за 1, то

$$\sum g_i = 1 \quad (6)$$

И тогда гармонический средний диаметр рассчитывается по формуле:

$$Dr = \frac{1}{\sum \frac{g}{D_{ri}}} \quad (7)$$

где g_i – вес каждой i -ой группы частиц; D_{ri} – диаметр одинаковых шарообразных частиц каждой i -ой группы частиц.

Учитывая тот факт, что для определения гранулометрических составов грунта мы использовали навески равные 100 г, формула примет следующий вид:

$$Dr = \frac{100}{\sum \frac{g}{D_{ri}}} \quad (8)$$

Определяем гармонический диаметр для зоны 1 по формуле (8):

$$Dr^1 = \frac{100}{\sum \frac{g}{D_{ri}}} = 0,17,$$

Определяем гармонический диаметр для зоны 2 по формуле (8):

$$Dr^2 = \frac{100}{\sum \frac{g}{D_{ri}}} = 0,11,$$

Определяем гармонический диаметр для зоны 3 по формуле (8):

$$Dr^3 = \frac{100}{\sum \frac{g}{D_{ri}}} = 0,086$$

На рис. 4. приведена зависимость коэффициента вспенивания наполнителя от его среднего гармонического диаметра.

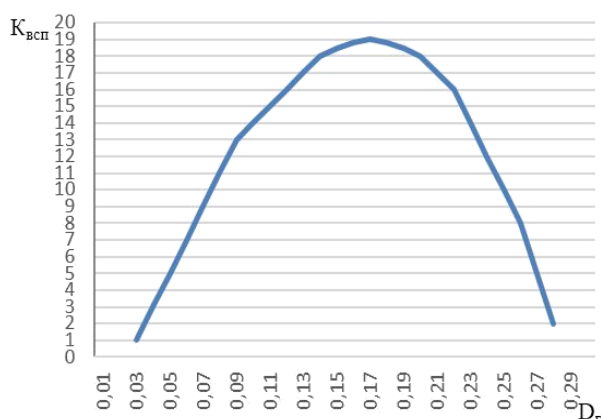


Рис. 4. Зависимость коэффициента вспенивания наполнителя от его среднего гармонического диаметра

Из рис. 4. и опытов, проведенных с различными минеральными наполнителями, имеющими различный гранулометрический состав следует, что при увеличении количества пылеватых частиц в составе наполнителя коэффициент вспенивания уменьшается, то же самое происходит при увеличении количества крупных частиц.

Это связано с тем, что пылеватые частицы попадая во влажную среду компонентов ППУ растворяются и создают пленку, препятствующую попаданию воздуха внутрь состава при перемешивании и вспенивании. Крупные частицы (размером более 1 мм) являются достаточно объемными, что не позволяет им встраиваться в структуру пенополиуретана, а их вес значительно затрудняет сам процесс перемешивания компонентов и последующее вспенивание ППУ.

При планировании эксперимента в качестве варьируемых факторов были приняты: расход хвостов и соотношение между компонентами. Для обеспечения более точного описания математических моделей пенополиуретана в зависимости от варьируемых факторов в виде полиномов второй степени было применено ортогональное центральное планирование. Условия планирования с указанием натуральных значений кодируемых факторов представлены в табл. 3 [18].

Средний уровень расхода хвостов, глины и песка был принят 30 % от массы полиуретана с шагом варьирования 20 %. Соотношение компонентов полиизоцианата и полиола на среднем уровне было принято 1, т.к. рекомендуемое соотношение полиуретановых компонентов без наполнителя составляет 100 : 100. Интервал варьирования составляет 0,1.

Таблица 3

Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	+1	0	-1	
Расход наполнителя, %	X_1	50	30	10	20
Соотношение компонентов	X_2	1,1	1,0	0,9	0,1

Таблица 4

Матрица планирования и экспериментальные данные

№ опыта	Факторы		$K_{всп}$ образцов пенополиуретана, наполненного хвостами		
	X_1	X_2	хвосты зоны 1, $\times 1000$	хвосты зоны 2, $\times 1000$	хвосты зоны 3, $\times 1000$
1	+1	+1	630	520	420
2	+1	-1	610	510	410
3	-1	+1	1070	680	480
4	-1	-1	1050	670	470

По результатам полученных уравнений были построены математические модели зависимости коэффициента вспенивания лабораторных проб пенополиуретана от исследуемых факторов (рис. 5–7).

Сущность метода заключается в установлении математической зависимости между заданными свойствами материала и расходом, свойствами составляющих компонентов и технологическими факторами. Количество экспериментов, зависящее от числа факторов и условий решаемой задачи, проводилось по заданному соответствующему плану. Матрица планирования и экспериментальные данные представлены в табл. 4.

Результаты опытов обрабатывают с использованием методов математической статистики, получая при этом алгебраические уравнения, отражающие связь между исследуемыми свойствами и исходными факторами; с помощью уравнений регрессии можно строить графики и номограммы, что позволяет оперативно установить значение выходного параметра при изменении каждого фактора. При использовании номограмм можно поддерживать на заданном уровне выходной параметр, изменяя соответствующим образом факторы, входящие в уравнение регрессии.

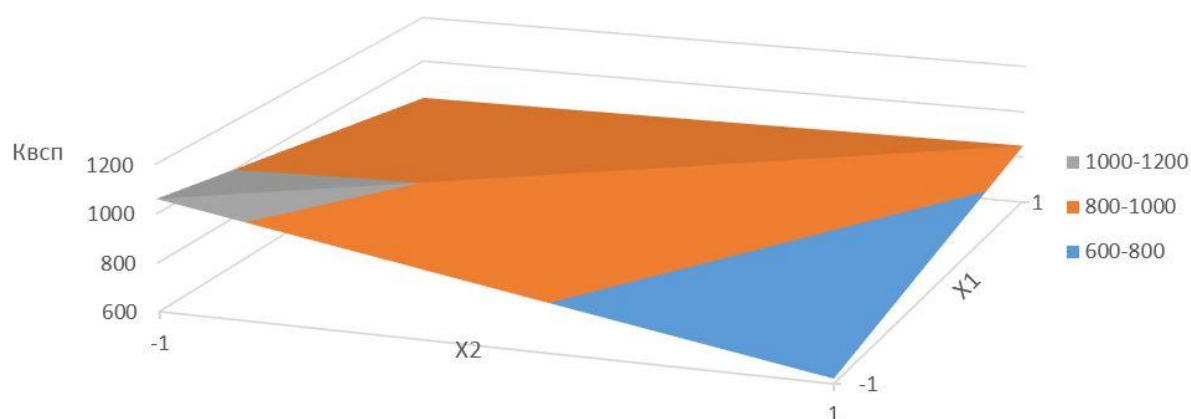


Рис. 5. Математическая модель зависимости коэффициента вспенивания лабораторных проб пенополиуретана, наполненного хвостами 1 зоны

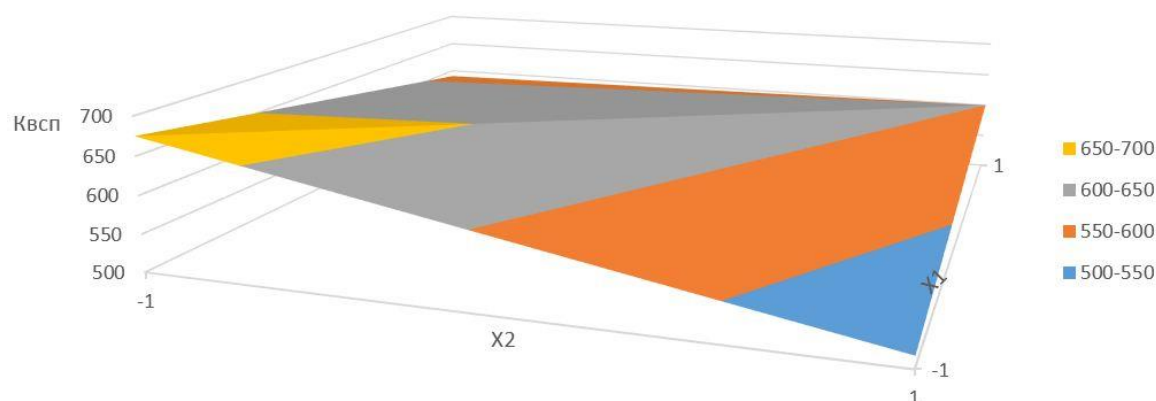


Рис. 6. Математическая модель зависимости коэффициента вспенивания лабораторных проб пенополиуретана, наполненного хвостами 2 зоны

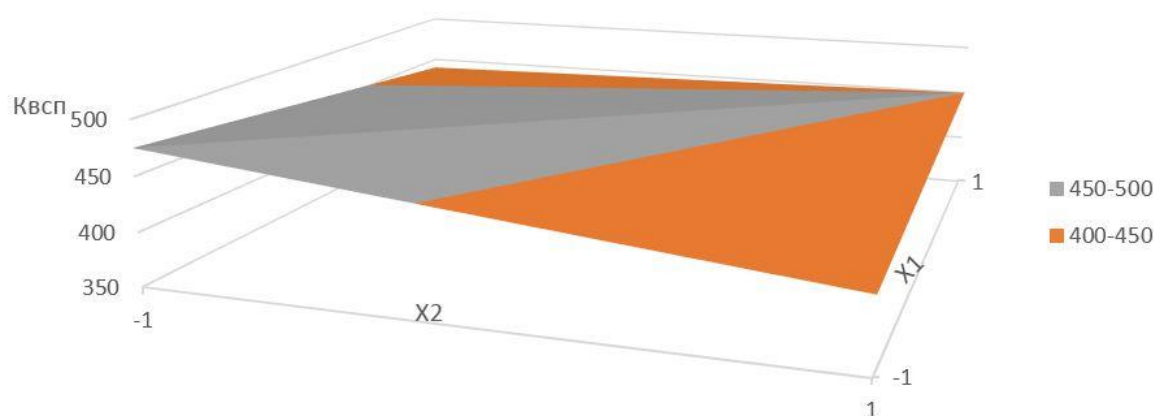


Рис. 7. Математическая модель зависимости коэффициента вспенивания лабораторных проб пенополиуретана, наполненного хвостами 3 зоны

При переходе от кодированных факторов к натуральным, найдено оптимальное соотношение компонентов, которое составляет 100:100.

Таким образом, выявленные закономерности изменения свойств пенополиуретанов и полученные математические зависимости позволяют дать количественную и качественную оценку влияния каждого фактора в отдельности, а также их совокупности на изменение системы «состав –

свойства» и могут быть использованы для производственных рецептур наполненных пенополиуретанов и прогнозирования их физико-механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Технология полимеров. М.: Высшая школа, 1980. 303 с.

2. Fukuhiro H., Genjiro H., Yoshio I. Hydrophilic polyurethane and application (II) (polyurethane – gypsum foam). *Plastics Industry News*. 1981. May. Pp. 71–74.
3. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1989. 383 с.
4. Сулейманова Л.А., Кочерженко А.В., Марушко М.В. Теплоизоляционный композит на основе местных неорганических наполнителей // В сборнике докладов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации». Белгород, 2016. С. 185–189.
5. Herrington R., Hock K. Flexible Polyurethane Foams – Dow Chemical Company 1997. 312 p.
6. Берлин А.А., Шутов Ф. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия. 1980. 224 с.
7. Воробьев В.А. Технология строительных материалов и изделий на основе пластмасс. М.: Высшая школа, 1974. 472 с.
8. Гильдебрант Х. Полимерные материалы в строительстве. Пер. с нем. М.: Стройиздат, 1969. 272 с.
9. Годилю П.В., Патуроев В.В., Романенков И.Г. Беспредельные пенопласты в строительных конструкциях. М.: Стройиздат, 1969. 173 с.
10. Benning C.J. Plastics foams. Vol. 1. New York, London, Sydney, Toronto. John Wiley a. Sons. 1969. 620 p.
11. Швецов Г.А., Алимова Д.У., Барышников М.Д. Технология переработки пластических масс. М.: Химия, 1988. 512 с.
12. Корнеев А.Д., Шулепов С.К. Структурообразование пенополимербетона на основе полиизоцианата // Эффективные строительные материалы для Нечерноземья: Тез. докл. науч.-техн. конф. Саранск: Рузаевский печатник. 1986. С. 18.
13. Сулейманова Л.А., Кочерженко А.В. Исследование влияния природных наполнителей на кратность вспенивания утеплителей на основе пенополиуретана // В сборнике докладов Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства). Белгород, 2017. С. 185–190.
14. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Полимерные теплоизоляционные материалы М.: Стройиздат, 1972. 320 с.
15. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров. М.: Наука, 1979. 390 с.
16. Friedli H.R. In Reaction Polymers. Hansen Munich. 1992. 68 p.
17. Lovering E.G., Laidler K.J. Thermochemical studies of some alcohol – isocyanate reactions – Can. J. Chemical, 1962. pp. 30-31.
18. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А. Компьютерное моделирование технологических задач. Белгород, 2009. 184 с.

Информация об авторах

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

Кочерженко Андрей Владимирович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: Ksinon3@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рябчевский Игорь Сергеевич, магистрант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kloud09@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в марте 2019 г.

© Сулейманова Л.А., Кочерженко А.В., Рябчевский И.С., 2019

^{1,*}**Suleymanova L.A., ¹Kocherzhenko A.V., ¹Ryabchevskiy I.S.**

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

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

DEPENDENCE OF FOAMING COEFFICIENT ON THE AVERAGE HARMONIC DIAMETER OF POLYURETHANE FOAM

Abstract. Currently in Russia, great importance is attached to actual issues of energy saving and energy efficiency in construction. Valid regulations require addressing issues related to improving the energy efficiency of buildings. The development and manufacture of new types of effective thermal insulation materials

is one of the ways to solve assigned tasks. The use of industrial waste from mining and processing plants as a filler for polyurethane foam is considered in this paper. Samples from the filtration field of the tailings of Stoilensky GOK from various sites are taken as the studied raw materials; their granulometric, chemical compositions and harmonic diameters of the filler particles are determined. According to the calculation results, the dependence of the foaming coefficient on the average harmonic diameter of the filler is determined. The experiment-planning matrix is developed; according to its results, mathematical models are constructed for the dependence of the foaming coefficient of laboratory samples of polyurethane foam filled with tails. Three tail zones based on the results of sampling are considered. Analyzing the obtained results, a quantitative and qualitative assessment of the influence of each factor individually and their combination on the change in the "composition – properties" system is derived.

Keywords: polyurethane foam, filler, mathematical modeling, foaming coefficient, mining waste, harmonic diameter.

REFERENCES

1. Vorobiev V.A., Andrianov P.A. Polymer technology [Tekhnologiya polimerov]. M.: Higher School. 1980. 303 p. (rus)
2. Fukuhiro H., Genjiro H., Yoshio I. Hydrophilic polyurethane and application (II) (polyurethane – gypsum foam). Plastics Industry News. 1981. May. Pp. 71–74.
3. Gorlov Yu.P. Technology of thermal insulation materials and products [Tekhnologiya teploizolyacionnyh materialov i izdelij]. Moscow: Higher School. 1989. 383 p. (rus)
4. Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V. Study of the influence of natural fillers on the multiplicity of foaming of insulators based on polyurethane foam [Teploizolyacionnyj kompozit na osnove mestnyh neorganicheskikh napolnitelej]. V sbornike dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Naukoemkie tekhnologii i innovacii». Belgorod, 2017. Pp. 185–190. (rus)
5. Herrington R., Hock K. Flexible Polyurethane Foams – Dow Chemical Company 1997. 312 p.
6. Berlin A.A., Shutov F.A. Strengthened gas-filled plastics [Uprochnennye gazonapolnennye plastmassy]. M.: Chemistry. 1980. 224 p. (rus)
7. Vorobiev V.A. Technology of building materials and products based on plastics [Tekhnologiya stroitel'nyh materialov i izdelij na osnove plastmass]. M.: Higher School, 1974. 472 p. (rus)
8. Hildebrandt X. Polymer materials in construction [Polimernye materialy v stroitel'stve]. Trans. with Ger. M.: Build a building, 1969. 272 p.
9. Godilo P.V., Paturoev V.V., Romanenkov I.G. Unpressurized foam in building structures [Bespressovyye penoplasty v stroitel'nyh konstrukciyah]. M.: Stroiizdat, 1969. 173 p. (rus)
10. Benning C.J. Plastics foams. Vol. 1 – New York, London, Sydney, Toronto. John Wiley & Sons. 1969. 620 p.
11. Shvetsov G.A., Alimova D.U., Baryshnikova M.D. Plastics processing technology [Tekhnologiya pererabotki plasticheskikh mass]. M.: Chemistry, 1988. 512 p. (rus)
12. Korneev A.D., Shulepov S.K. Polyisocyanate-based foam polymer concrete structure formation [Strukturoobrazovanie penopolimerbetona na osnove poliizocianata]. Effektivnye stroitel'nye materialy dlya Nechernozem'ya: Tez. dokl. nauch.-tekhn. konf. Saransk: Ruzaevsky printer. 1986. p. 18. (rus)
13. Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V., Marushko M.V. Thermal insulation composite based on local inorganic fillers [Issledovanie vliyaniya prirodnnyh napolnitelej na kratnost' vspeivaniya utep-litelej na osnove penopoliiuretana]. V sbornike dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauka i innovacii v stroitel'stve» (k 45-letiyu kafedry stroitel'stva i gorodskogo hozyajstva). Belgorod. 2016. Pp. 185–189. (rus)
14. Vorobiev V.A., Andrianov P.A. Polymeric insulation materials [Polimernye teploizolyacionnye materialy]. M.: Build a building, 1972. 320 p. (rus)
15. Berlin A.A., Shutov F.A. Gas-filled high polymer chemistry and technology [Himiya i tekhnologiya gazonapolnennykh vysokopolimerov]. M.: Science. 1979. 390 p. (rus)
16. Friedli H.R. In Reaction Polymers – Hansen Munich. 1992. 68 p.
17. Lovering E.G., Laidler K.J. Thermochemical studies of some alcohol – isocyanate reactions – Can. J. Chemical, 1962. Pp. 30–31.
18. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A. Computer simulation of technological and economic problems [Komp'yuternoe modelirovanie tekhnologo-ehkonomicheskikh zadach]. Belgorod, 2009. 184 p. (rus)

Information about the authors

Suleymanova, Lyudmila A. DSc, Professor. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kocherzhenko, Andrey V. Postgraduate student. E-mail: Ksinon3@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryabchevskiy, Igor S. Master student. E-mail: kloud09@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in March 2019

Для цитирования:

Сулейманова Л.А., Кочерженко А.В., Рябчевский И.С. Зависимость коэффициента вспенивания от среднего гармонического диаметра пенополиуретана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 28–35. DOI: 10.34031/article_5ce292c9837090.54164650

For citation:

Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V., Ryabchevskiy I.S. Dependence of foaming coefficient on the average harmonic diameter of polyurethane foam. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 28–35. DOI: 10.34031/article_5ce292c9837090.54164650

DOI: 10.34031/article_5ce292c52da5c9.83158267

^{1,*}Шорстов Р.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

*E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И РЕЦЕПТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Аннотация. В статье рассмотрена возможность регулирования за счет изменения количества алюминиевой пасты, температуры воды затворения и бортов формы сроков вспучивания формовочной смеси автоклавного газобетона и достижения заданной максимальной температуры массива, от которой зависит характер поровой структуры и физико-механические свойства изделий. С использованием метода математического планирования эксперимента получены математические модели оптимизации физико-механических свойств автоклавного газобетона за счет регулирования технологических и рецептурных параметров. Установлено, что оптимальными параметрами являются температура воды затворения 40...45 °С, количество алюминиевой пасты – 0,6 % от массы вяжущего, температура бортов формы 85...90 °С, при которых создаются благоприятные условия для вспучивания газобетонной смеси и совмещения во времени процессов порообразования и набора структурной прочности массива, позволяющие получить оптимальную пористую структуру с более мелкой и равномерной пористостью при достаточно низкой плотности и высокой прочности.

Ключевые слова: газобетон, температура воды затворения, температура бортов формы, процесс поризации, газообразователь.

Введение. Свойства газобетона зависят от качества применяемых сырьевых материалов и правильно установленного и подобранного режима изготовления. Из-за неправильно подобранных компонентов, их количества или технологических параметров могут появляться различного рода дефекты, такие как трещины и разрывы, возникающие в процессе реакции вспучивания массива из-за несоответствия скорости роста объема массива и твердения, чрезмерного давления водяного пара и водорода внутри массива при высокой вязкости смеси или высокой скорости процесса роста объема массива при повышенной скорости набора сырьевой прочности газобетона, что может быть обусловлено повышенным содержанием в смеси извести, цемента или обратного шлама, использованием слишком тонкодисперсной и активной алюминиевой пасты, слабообожженной извести, тонкомолотого сырья, цемента с добавками, высокой температурой заливки смеси, повышенной вязкостью смеси из-за низкого водотвердого отношения смеси или высокой прочностью поверхностного натяжения пленки воды в бетонной смеси [1–6].

Прочность газобетона является обратной функции средней плотности, которая напрямую зависит от пористости, характер которой также зависит от многих параметров. Например, при использовании быстрогасящейся извести структура ячеистого бетона неравномерная, поры со-общающиеся и большого диаметра, поэтому необходимо применение замедлителей ее гашения, а при очень тонком помоле кремнеземистого компонента и при уменьшении В/Т в ячеистом бетоне образуется большое количество пор малого диаметра [7].

Основная часть. С целью изучения влияния температуры воды затворения на разогрев и вспучивание формовочной смеси и свойства автоклавного газобетона образцы формовали в формах размерами 100×100×300 мм. В качестве сырьевых материалов применяли портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (г. Старый Оскол), известь воздушную кальциевую негашеную производства ОАО «Цех обжига извести» (г. Старый Оскол) и кварцевый песок (Белгородская обл.), природный гипс, химический состав которых приведен в табл. 1, и пасту алюминиевую производства фирмы ECKART, Германия.

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов, мас. %

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	CaO _{св}	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	ппп
Портландцемент	22,49	4,77	4,40	67,22	0,44	2,45	0,62	0,35	–	–	–	–	0,23
Известь	3,17	0,99	0,17	80,92	1,42	1,03	0,56	–	–	–	–	–	11,56
Гипс	0,6	0,64	0,08	38,56	1,01	52,85	–	–	–	–	–	–	6,67
Песок кварцевый	94,9	3,46	0,284	0,282	0,064	–	–	–	0,107	0,28	0,159	0,046	–

Начальную температуру формовочной смеси регулировали, меняя температуру воды затворения от 30 до 60 °С. При использовании воды с температурой 30 °С температура формовочной смеси низкая, вследствие чего вспучивание происходит медленно (рис. 1). Так при температуре воды затворения 30 °С формовочная смесь начинает вспучиваться только на 6 мин, в то время как при температурах 35 °С и 60 °С вспучивание начинается уже на 3 мин. Максимальная температура массива 91 °С достигается соответственно за 9 мин при температуре воды затворения 60 °С, однако такой быстрый процесс вспучивания приводит к разрыву газовых пор и созданию рваной ячеистой структуры с неравномерными, боль-

шого диаметра сообщающимися порами, что неблагоприятно сказывается на таких свойствах как прочность и теплопроводность (рис. 1). Оптимальной температурой воды затворения, при которой создаются благоприятные условия для вспучивания газобетонной смеси, получения оптимальной пористой структуры с более мелкой и равномерной пористостью при высокой прочности является температура равная 45 °С, при которой смесь начинает вспучиваться уже через 3 мин, а максимальная температура формовочной смеси 72 °С достигается только через 12 мин, что позволяет совместить во времени процессы порообразования и набора структурной прочности массива.

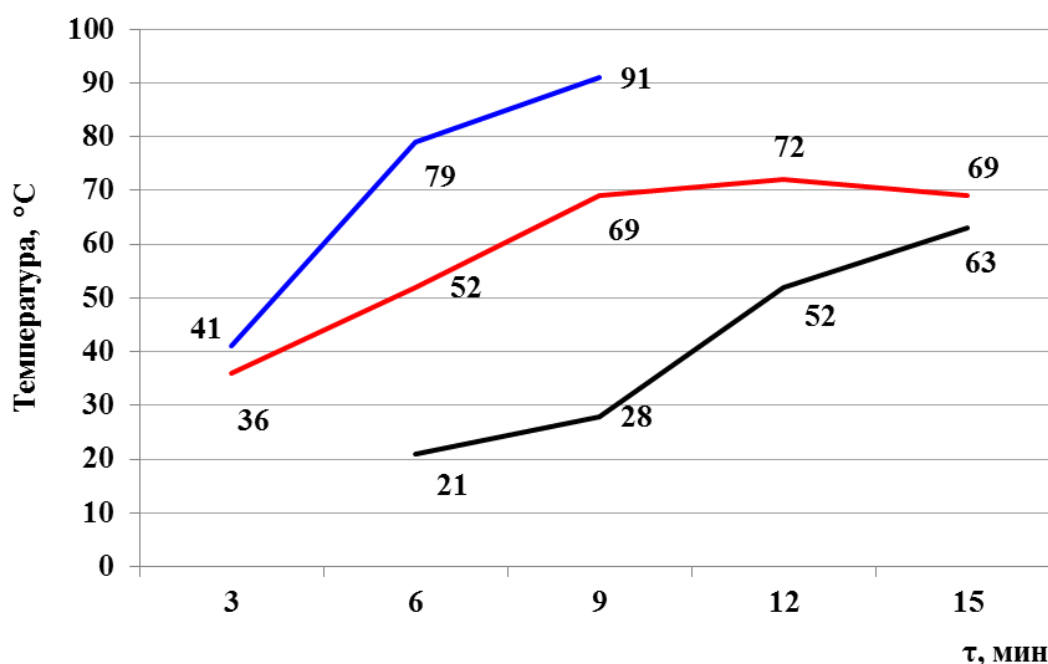


Рис. 1. Влияние температуры воды затворения на разогрев массива газосиликата:
— 30° — 45° — 60°

На температуру газобетонной смеси в форме может влиять также и температура самой формы, повышая температуру смеси у бортов, при этом чем дальше от формы, тем меньшее влияние будет оказывать температура формы на температуру смеси. Вследствие чего у бортов формы за счет более высокой температуры процесс порообразования будет идти более активно, а чем дальше вглубь массива, тем меньше, что будет способствовать созданию вариативной структуры газобетона за счет плавного перехода плотности от меньшей к большей от бортов формы вглубь массива.

Также на плотность газобетона при прочих равных условиях влияет и расход газообразователя, в данном случае алюминиевой пасты, но слишком большое количество газообразователя может привести к слишком быстрому вспучива-

нию, вследствие чего произойдет прорывание газовых пор и создание рваной ячеистой структуры, что также негативно скажется на свойствах изделия.

Для изучения совместного влияния этих факторов на свойства газобетона были проведены исследования с использованием метода математического планирования эксперимента [8]. В качестве варьируемых независимых технологических факторов были выбраны: температура воды затворения (X_1); количество алюминиевой пасты (X_2) и температура бортов формы (X_3). В качестве контролируемых параметров были выбраны: средняя плотность ($\rho_{ср}$) и прочность газобетона ($R_{сж}$). Выбранные технологические факторы были исследованы в пределах, указанных в табл. 2. Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными.

Таблица 2

Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	– 1	0	+1	
Температура воды затворения, °C	X_1	30	45	60	15
Al паста, % от массы вяжущего	X_2	0,4	0,6	0,8	0,2
Температура бортов формы, °C	X_3	50	70	90	20

Эксперимент проведен по трехуровневому плану и результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Матрица планирования и экспериментальные данные

№ точки плана	Фактор			$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	$R_{\text{сж}}$, МПа
	X_1	X_2	X_3		
1	+1	+1	+1	580	1,7
2	+1	+1	–1	420	2,1
3	+1	–1	+1	540	2,1
4	+1	–1	–1	540	4,4
5	–1	+1	+1	450	2,2
6	–1	+1	–1	540	5,1
7	–1	–1	+1	720	7,3
8	–1	–1	–1	870	6,5
9	+1	0	0	380	4,2
10	–1	0	0	480	3,4
11	0	+1	0	390	3,1
12	0	–1	0	580	4,2
13	0	0	+1	407	4,4
14	0	0	–1	480	3,47
15	0	0	0	530	3,51
16	0	0	0	565	3,47
17	0	0	0	570	3,41

– для средней плотности

$$Y_1 = 481,026 - 60 \cdot X_1 - 87 \cdot X_2 - 15,3 \cdot X_3 + 6,26 \cdot X_1^2 + 61,26 \cdot X_2^2 + 19,76 \cdot X_3^2 + 65 \cdot X_1 \cdot X_2 + 50 \cdot X_1 \cdot X_3 + 27,5 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

– для прочности на сжатие

$$Y_2 = 3,59 - 1,0 \cdot X_1 - 1,03 \cdot X_2 - 0,387 \cdot X_3 + 0,123 \cdot X_1^2 - 0,027 \cdot X_2^2 + 0,258 \cdot X_3^2 + 0,475 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,075 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,225 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

где $X_1 = \frac{t_{\text{смеси}} - 0,45}{0,1}$, $X_2 = \frac{Al_{\text{паста}} - 0,6}{0,2}$, $X_3 = \frac{t_{\text{формы}} - 10}{10}$.

Комплексное представление о влиянии исследуемых факторов на среднюю плотность и прочность на сжатие получено с помощью построенных номограмм (рис. 2).

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что физико-механические свойства зависят не только от вида сырьевых компонентов, их качества и количества, но и от многих других параметров, в частности температуры воды затворения и бортов формы. Так при низкой

температуре воды затворения (45 °C) и при температуре массива (70...75 °C) процесс вспучивания происходит медленно, что позволяет создавать более равномерную макроструктуру с более мелкой и равномерной пористостью при достаточно низкой плотности и высокой прочности, чем при быстром вспучивании. А при температуре воды затворения (60 °C) и температуре массива 95...100 °C прочность газобетона снижа-

ется, это объясняется тем, что с повышением температуры вяжущее гидратирует и связывается очень быстро, а водород, выделяющийся в ходе процесса газообразования, начинает частично разрушать уже сформированную затвердевающую макроструктуру, которая к тому же разрушается парами, создающимися при высокой температуре формовочной смеси, и образовавшиеся сообщающиеся поры и микротрещины уменьшают прочность массива.

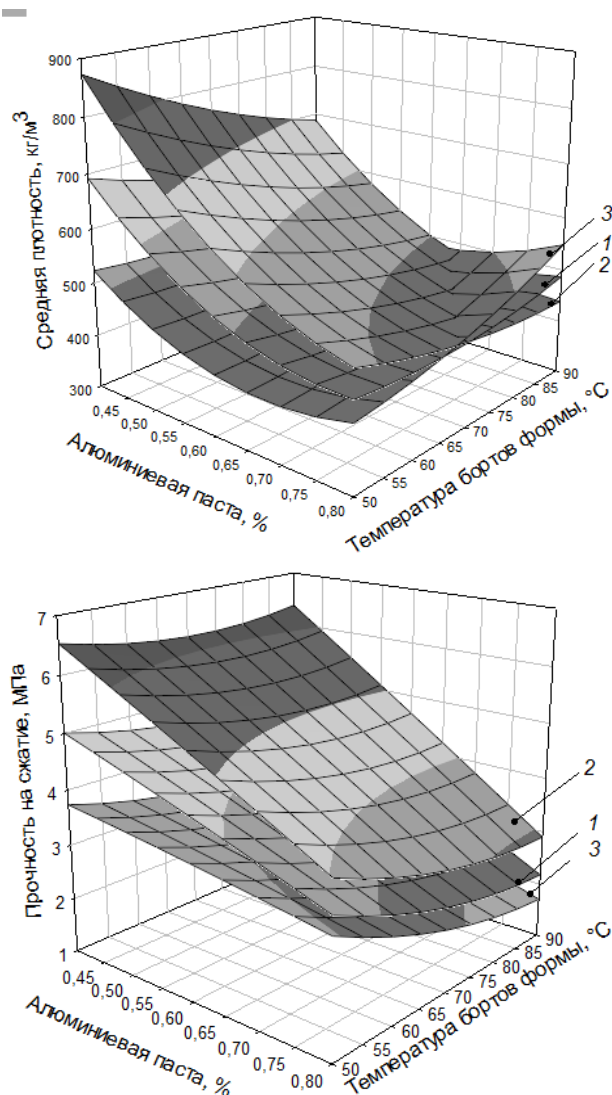


Рис. 2. Зависимости средней плотности и прочности на сжатие автоклавного газобетона от температуры воды затворения и бортов формы и количества алюминиевой пасты:

- 1 – температура воды затворения = 30 °C; 2 – температура воды затворения = 45 °C; 3 – температура воды затворения = 60 °C

Выводы. С целью сокращения сроков технологических операций и улучшения физико-механических свойств газобетона за счет создания оптимальных условий для вспучивания массива

и формирования оптимальной поровой структуры рекомендуется температуру воды затворения регулировать в интервале 40...45 °C, количество алюминиевой пасты – 0,6 % от массы вяжущего, а температуру бортов формы 85...90 °C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кафтаева М.В., Рахимбаев Ш.М. Обоснование технологии производства энергоэффективных автоклавных силикатных газобетонов. Белгород, 2015. 258 с.
2. Лаукайтис А.А. Прогнозирование некоторых свойств ячеистого бетона низкой плотности. 2001. №4. С. 27–29.
3. Лаукайтис А.А. Влияние температуры воды на разогрев формовочной смеси и свойства ячеистого бетона // Строительные материалы. 2002. №2. С. 37–39.
4. Гаджилы Р.А. Целенаправленное изменение пористой структуры строительных материалов // Строительные материалы. 2001. №8. С. 41–43.
5. Кара К.А., Шорстов Р.А., Сулейманов К.А., Воронов В.В. Реология газобетонных смесей на композиционных вяжущих с использованием техногенных песков // В сборнике: Научные технологии и инновации Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). 2014. С. 169–175.
6. Сулейманова Л.А., Кара К.А., Коломацкая С.А., Шорстов Р.А., Сулейманов К.А. Стадии роста газовых пор в ячеистобетонных смесях // В сборнике: Эффективные строительные композиты Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 611–614.
7. Биховских А.Е. Исследование технологических факторов формирования технологических свойств газосиликата для индустриального термоизоляции труб бесканальных тепловых сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Каунас, 1967.
8. Сулейманова Л.А. Компьютерное моделирование технолого-экономических задач: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальности 270106 – Производство строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 56 с.

Информация об авторах

Шорстов Роман Александрович, аспирант. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила в марте 2019 г.

© Шорстов Р.А., 2019

^{1,*} **Shorstov R.A.**¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

REGULATION OF PROCESS AND RECIPE PARAMETERS ON THE BASIS OF MODELING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

Abstract. The article discusses the possibility of regulation by changing the amount of aluminum paste, the temperature of the mixing water and the sides of mold for the expansion of molding sand of autoclaved aerated concrete. Also, the achievement of a given maximum temperature of the array, which determines the nature of the pore structure and physico-mechanical properties of products. Mathematical models for optimizing the physicomechanical properties of autoclaved aerated concrete by regulating technological and prescription parameters are obtained using the method of mathematical planning of an experiment. It is established, optimal parameters are the mixing water temperature of 40 ... 45 ° C, the amount of aluminum paste - 0.6% of the binder mass, the temperature of the sides of the form 85 ... 90 ° C, which creates favorable conditions for the expansion of the gas-concrete mixture and the combination of pore formation and set-up structural strength of the array, allowing to obtain an optimal porous structure with smaller and uniform porosity with a sufficiently low density and high strength.

Keywords: aerated concrete, temperature of the mixing water, temperature of the sides of the mold, the process of porisation, the gasifier.

REFERENCES

1. Kaftaeva M.V., Rakhimbaev S.M. Substantiation of the technology of manufacturing energy-efficient autoclaved sand-lime aerated concrete [*Obosnovanie tekhnologii proizvodstva energoeffektivnykh avtoklavnykh silikatnykh gazobetonov*]. Belgorod. 2015. 258 p. (rus)
2. Laukaitis A.A. Prediction of some properties of cellular concrete of low density [*Prognostirovanie nekotorykh svoystv yacheistogo betona nizkoj plotnosti*]. 2001. No. Pp. 27–29. (rus)
3. Laukaitis A.A. The influence of water temperature on the heating of the molding mixture and the properties of cellular concrete [*Vliyanie temperatury vody na razogrev formovochnoj smesi i svoystva yacheistogo betona*]. Building materials. 2002. No. 2. Pp. 37–39. (rus)
4. Gadzhily R.A. Purposeful change of porous structure of building materials [*Celenapravlennoe izmenenie poristoy struktury stroitel'nykh materialov*]. Building materials. 2001. No. 8. Pp.41–43. (rus)
5. Kara K.A., Shorstov R.A., Suleymanov K.A., Voronov V.V. Rheology of concrete mixtures on composite binders with the use of man-made sand [*Reologiya gazobetonnykh smesey na kompozitsionnykh vyazhushchiy s ispol'zovaniem tekhnogennykh peskov*]. In the book: Naukoemkie tekhnologii i innovatsii Yubilejnaya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya 60-letiyu BGТУ im. V.G. Shuhova (XXI nauchnye chteniya). 2014. Pp.169-175. (rus).
6. Suleymanova L.A., Kara K.A., Kolomatskaya S.A., Shorstov R.A., Suleymanov K.A. The stage of growth of gas pores in cellular concrete mixtures [*Stadii rosta gazovykh por v yacheistobetonnykh smesyakh*] In the book: Effektivnye stroitel'nye kompozity Nauchno-prakticheskaya konferenciya k 85-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Yuriya Mihajlovicha. Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. Belgorod state technological University them. V. G. Shukhov. 2015. Pp. 611–614. (rus).
7. Bykhovsky A.E. Research of technological factors of formation of technological properties of gas silicate for industrial thermal insulation of pipes of channel-free heat networks [*Issledovanie tekhnologicheskikh faktorov formirovaniya tekhnologicheskikh svoystv gazosilikata dlya industrial'nogo termoizolirovaniya trub beskanal'nykh teplovykh setej*]: thesis abstract of candidate of technical Sciences. Kaunas, 1967. (rus).
8. Suleymanova L.A. Computer modeling of technological and economic problems [*Komp'yuternoe modelirovanie tekhnologo-ekonomicheskikh zadach*]: guidelines for the implementation of the

course work for students majoring in 270106 – Production of building materials, products and structures. Belgorod: publishing house of BSTU, 2008. 56 p. (rus).

Information about the authors

Shorstov, Roman A. Postgraduate student. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in March 2019

Для цитирования:

Шорстов Р.А. Регулирование технологических и рецептурных параметров на основе моделирования физико-механических свойств автоклавного газобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 36–41. DOI: 10.34031/article_5ce292c52da5c9.83158267

For citation:

Shorstov R.A. Regulation of process and recipe parameters on the basis of modeling physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 36–41. DOI: 10.34031/article_5ce292c52da5c9.83158267

DOI: 10.34031/article_5ce292c9b184d5.39570191

¹Донченко О.М., ¹Дегтев И.А., ^{1,*}Тарасенко В.Н., ²Жихарев Н.Д.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

*E-mail: tarasenko.vn@bstu.ru

ДЕФОРМАЦИИ РАСТВОРА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ШВОВ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СЖАТИИ

Аннотация. Обоснована необходимость установления и значения действительных закономерностей деформирования растворов в горизонтальных швах каменной кладки на всех стадиях ее работы – в отсутствии и развитии трещин, при исчерпании сопротивления, составляющих от 80 – 85 % общих деформаций кладки при кратковременном сжатии. Обращено внимание на отсутствие в научной литературе сообщений о проведении и результатах исследований по пространственному напряженно-деформативному состоянию раствора в швах кладки при сжатии.

Подчеркиваются преимущества исследования секущего модуля деформации E_p при решении многих задач по теории работы и методике расчета каменной кладки.

На основании обработки результатов многолетних исследований, аналитически и графически показано существенное отличие изменения секущего модуля деформации E_p цементных растворов различной прочности горизонтальных швов каменной кладки от характера его изменения при испытании растворов в стандартных образцах.

Отмечены преимущества разработанной методики обработки результатов исследований растворов в стандартных образцах, позволяющей более точно устанавливать действительные значения их нормального модуля деформации E_0 и предельную относительную деформацию при сжатии.

Приведены аналитические зависимости коэффициента пластичности и секущего модуля деформаций E_p , установленные на основании обработки результатов многочисленных исследований кладочных растворов.

Ключевые слова: прочность, деформативность, каменная кладка, строительный раствор, горизонтальные швы, сжатие, снижение модуля деформации, пространственное напряженное состояние, изменение модуля деформации.

Введение. Для многих задач и вопросов теории работы и методов расчета конструкций каменной кладки необходимо знание действительных законов деформирования растворов в её горизонтальных швах при силовом сжатии. Деформации кладки необходимо знать на всех стадиях и уровнях ее работы – в отсутствие первых вертикальных трещин в камнях в 1-ой стадии, при появлении таких трещин в двух смежных рядах камней во 2-ой стадии, при развитии вертикальных магистральных трещин неармированной кладки в 3-ей и, конечно, в 4-ой стадии при исчерпании её сопротивления. Знание этих закономерностей деформирования необходимо для конструктивных расчетов элементов при эксплуатации разно нагруженных и многослойных стен, стен с наружными и внутренними облицовками, пересечений разно высоких наружных и внутренних стен для предотвращения их растрескивания и разрушения.

Основная часть. В научно-технической литературе редко приводятся результаты исследований характера и характеристик деформирования строительных растворов, считая эти вопросы

неактуальными в то время, когда более 65 % стен зданий устраиваются кладкой из кирпича и мелких искусственных камней. Все больше сообщается о законах деформирования различных видов современных бетонов. А характер деформирования строительных растворов, применяемых для каменной кладки, как обычно, привыкли считать таким, каким он устанавливается при испытании раствора в стандартных образцах – кубках с ребром в 70 мм и такого же поперечного сечения призм, в которых величина модуля начальной деформации E_0 , обычно называемого начальным модулем упругости, с ростом нагружения постепенно уменьшается до нуля.

Естественно, что такой подход назвать верным нельзя. Поскольку касательный модуль деформации E при исчерпании сопротивления материала равен нулю, то и соответствующая этому предельная деформация сжатия ϵ_R должна быть бесконечной, что совершенно противоречит результатам физических экспериментов. Поэтому все чаще исследователи стараются оперировать

не с касательным, а с секущим модулем деформаций E' , так называемым «средним модулем деформаций».

В последнее время наиболее известной работой в рассматриваемом направлении является исследование профессоров В.В. Пангаева и В.М. Сердюка [1], считающего, что средний модуль деформаций E' цементных растворов при кратковременном равномерном 10-ступенчатом сжатии по сравнению с величиной начального модуля деформаций E_0 до уровня нагрузки P , равной $0,3 \cdot P_{раз.}$, вначале сохраняют свое начальное значение с постепенным уменьшением своей величины на последующих ступенях нагружения, вплоть до значений $0,28$ и $0,10 \cdot E_0$ на двух, соответственно, последних ступенях нагружения и исчерпании сопротивления.

Такой подход, по нашему мнению, является положительным, поскольку хотя бы в первом приближении позволяет осуществлять конструктивные расчеты на многих уровнях нагружения и эксплуатации кладки. Однако, к определенным его недостаткам следует отнести предполагаемое распространение постоянного характера и относительных значений E' на все цементные растворы прочностью от марки М10 до М200, что экспериментально не подтверждается, а также и то, что величины секущего модуля деформаций E' на последних двух ступенях нагружения авторы [1] получали не опытным путем, а установили их чисто аналитически посредством экстраполяции вперед.

Проведенные нами в течение последних 40 лет в Харьковском инженерно-строительном институте и в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова многочисленные исследования трещиностойкости и сопротивления кладки и ее отдельных элементов: кирпича, мелких искусственных камней, смешанных и цементных растворов [2, 3, 7, 8, 11–19, 21, 22] убедительно показали явное различие количественного характера изменения модуля деформаций E' этих материалов при центральном сжатии с уровнем нагружения цементных растворов различных марок и различной прочности. При этом все испытания кладочных растворов мы производили с постоянной нормативной скоростью нагружения вплоть до их разрушения, а показания тензорезисторов дублировали показаниями механических индикаторов, работающих благодаря системе крепления инженера Василенко обратным ходом, без их удаления до самого разрушения образцов, что увеличивало точность измерения отсчетов на последних ступенях нагружения.

В качестве примера характера деформирования стандартных образцов цементных растворов

на графике (рис. 1) приведены лишь кривые деформирования цементных растворов марок М25 и М200 (рис. 1 А, В), полученные по результатам наших исследований [2, 3, 7, 8, 11–19], которые существенно отличаются друг от друга, и от единой кривой деформирования цементных растворов всех марок по исследованиям В.В. Пангаева и В.М. Сердюка (рис. 1С).

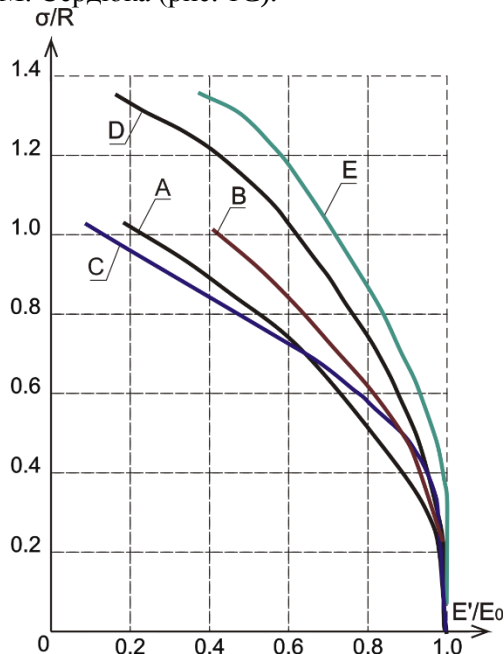


Рис. 1. Изменение секущего модуля деформаций E' цементных растворов с уровнем нагружения:

А, В – эксперименты авторов, соответственно, для марок М50 и М200; С – расчетные значения по данным В.В. Пангаева; D, Е – расчетные значения по методике авторов для растворов марок М50 и М200 соответственно, в горизонтальных швах каменной кладки.

Этот график, построенный в новых координатах $\sigma/R - E'/E_0$, является более обозримым с легко получаемым по результатам опытов на каждой ступени нагружения отношением величин напряжения σ и абсолютной деформации Δl .

Столь необычная для экспериментальных исследований монотонная гладкость наших кривых деформирования (без отдельных выбросов) стандартных образцов цементных растворов и установление конкретных предельных значений их модулей деформаций E'_R и соответствующих предельных деформаций сжатия σ_R без обычного разброса, характерных для других исследований [4, 5, 9, 10, 20, 23–26], объясняется постоянным использованием в наших исследованиях [2, 3] единой методики проведения испытаний и обработки их результатов.

Эта методика испытания образцов была принятой следующей:

– опорные грани призм тщательно пришлифовывались;

– центрирование осуществлялось под нагрузкой $0,05 \dots 0,3 R_{\text{раз.}}$ с последующей 3-кратной разгрузкой и нагрузкой. Убедившись в достаточном равенстве деформаций по всем 4 граням (разность отсчетов не превышала $10 \dots 15 \%$), приступали к дальнейшему испытанию образца до разрушения;

– два образца-близнеца для определения R испытывали в условиях непрерывного нагружения со скоростью $0,8 \dots 0,15 \text{ кг/см}^2$ в секунду до разрушения. Определение скорости осуществляли по секундомеру и в момент, предшествующий разрушению, скорость деформирования образца приходилось увеличивать;

– следующие два образца-близнеца испытывали с одномоментными остановками на каждой ступени для снятия отсчетов и осмотра образца до уровня $0,9 R_{\text{раз.}}$, после чего нагружение производили непрерывно до разрушения. Снятие показаний отсчетов по всем 4 граням производили одновременно;

– всю серию, состоящую из 4 призм, испытывали в течение суток.

Такая методика позволила установить единообразие в испытаниях опытных образцов, что нашло отражение в увеличении стабильности полученных результатов, но все же не избавила от необходимости выработки специальной методики их обработки, в связи с их естественным разбросом на первой и последней ступенях нагружений. Эта методика заключалась в корректировке нулевых отсчетов, установлении достоверного значения начальных модуля деформаций E_0 и наиболее достоверных значений предельного секущего модуля деформации E'_R .

Из лабораторной практики хорошо известно, что установление начального модуля деформаций E_0 сопряжено с определенными погрешностями с начальным нагружением, мертвым ходом приборов и некоторыми условностями начальных отсчетов. Профессор О.Я. Берг [5] отмечал, что в лабораторных испытаниях начальные деформации обычно уходят из поля зрения испытателя. Первые замеры деформаций, связанные с центрированием образцов, не учитываются в последующем. Кроме того, всегда принимается некоторая минимальная нагрузка на образец, относительно которой снимаются нулевые отсчеты. Связанные с этим погрешности иногда приводят к тому, что начальный модуль деформации при напряжениях $(0,02 \dots 0,10) R$ может быть получен намного ниже, чем при напряжениях $0,2 R$, что является ошибочным.

Для устранения указанных недостатков и получения сравнимых данных, результаты проведенных авторами испытаний подвергались единому методу обработки, который заключался в

корректировке нулевых и предельных отсчетов и установлении достоверных значений начальных модулей деформации E_0 . Сущность указанного метода основывалась на том, что начальное значение модуля деформаций E_0 не может быть меньше значения секущего модуля деформаций E' , соответствующего напряжению $0,2 R$. Практически это выливалось в требование, чтобы первые, вторые, третьи и четвертые разности отсчетов корректировались таким образом, чтобы приращения последних отсчетов были бы равными или монотонно увеличивающимися. Такое корректирование опытных значений E_0 и E'_R было необходимым проводить, как правило, не далее третьих-четвертых разностей. Все это позволило получать более достоверные значения E_0 , E' , E'_R и E_R и определенное единство формы кривых $E'/E_0 - \sigma/R$ для всех испытанных цементных растворов различной прочности – марок M25 – M200.

Для аппроксимации полученных таким образом кривых деформирования цементных растворов несложными аналитическими функциями необходимо было удовлетворять требованиями их прохода через три главные точки: до начала нагружения, когда $\sigma/R = 0$, а $E' = E_0$; при уровне нагружения $\sigma/R = 0,2$ и при предельном значении нагрузки, когда $\sigma/R = 1,0$, т.е. при исчерпании сопротивления образца. Этим требованиям по результатам наших опытов в наилучшей мере соответствует зависимость секущего модуля деформаций в виде

$$E' = E_0 \cdot \left[1 - \lambda \cdot \left(\frac{\sigma}{R} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где коэффициент λ зависит только от прочности (марки) раствора и равняется:

$$\lambda = 1 - \frac{E'_R}{E_0}. \quad (2)$$

В зависимостях (1) и (2) коэффициент λ наилучшим образом соответствует характеристике пластичности при исчерпании сопротивления цементных растворов, равной отношению работы, затраченной на пластическое деформирование, к общей работе по деформированию и разрушению образца. Анализ результатов проведенных авторами исследований позволил получить несложную зависимость этого коэффициента от прочности цементных растворов в виде:

$$\lambda = \frac{1}{(1,1 + 0,003)}, \quad (3)$$

которая, в частности для растворов марки M50 и M200 дает, соответственно, значения их пластичности $0,80$ и $0,60$. При этом отношение E'_R/E_0 может отражать степень упругости цементных растворов при разрушении.

Всё вышеизложенное касалось только деформирования цементных растворов в стандартных образцах (кубики и призмы), при которых измерения нагрузок и деформаций осуществляется точными методами. Что же касается аналогичных измерений напряжений и деформаций растворов в горизонтальных швах каменной кладки, то их точное установление современными методами и приборами весьма затруднительно и практически невозможно. В отличие от простого напряженно-деформированного состояния (НДС) стандартных образцов при центральной сжатии, раствор в горизонтальных швах каменной кладки находится в сложном пространственном состоянии сжатия, при котором его прочность при исчерпании сопротивления кладки и продольные деформации существенно увеличиваются. Достаточно лишь указать на прочность кладки из кирпича М300 на растворе М25, величина которой (50 кг/см^2) вдвое превышает исходную прочность раствора и разрушение ее происходит по кирпичу.

Действительно, как показали опыты многих исследований, и, в частности, С.А. Семенцова, С.В. Полякова, авторов [4, 24], деформации раствора в швах кладки значительно отличаются от деформаций призм, выполненных из того же раствора, и их точное определение чрезвычайно затруднительно. Это объясняется сложной микро- и макронеоднородной композитной средой кладки, состоящей из конгломерата дискретно расположенных камней и обволакивающих их слоев раствора, т.е. многократно статически неопределимой системы, для решения которой применять дифференциальные уравнения классической теории упругости и пластичности недопустимо, поскольку не выполняются их основные предпосылки о сплошности и однородности материала.

Здесь необходимо совместное рассмотрение условий равновесия и деформаций, поскольку условия работы в кладке камня и раствора различных видов диаметрально противоположны. Камень сжимается нагрузкой в вертикальном и растягивается обычно более деформативным раствором в поперечных направлениях, в результате чего его прочность в кладке оказывается существенно меньшей стандартной прочности на сжатие. Раствор, поперечные деформации которого сдерживаются менее деформативным камнем, наоборот, неравномерно сжимается и в вертикальном, и в поперечных направлениях, в связи с чем его прочность в отличие от деформаций значительно увеличивается.

Закключение. Таким образом, поскольку согласно теории удельной потенциальной энергии

формоизменения Губера – Мизеса – Генки в записи П.П. Баландина [6] можно считать доказанным явное увеличение предельной прочности раствора в кладке, то ей должно соответствовать не стандартное, а действительное изменение обычного развития его деформаций и секущего модуля E'_R , установить которые пока в опытах весьма затруднительно. В отсутствие в настоящее время физически достоверной деформационной теории пластичности растворов [6], в своих теоретических исследованиях и расчетах мы пользовались нашей уточняющей для этого случая аналитической зависимостью

$$E' = E_0 \cdot [1 - 0,5 \cdot \lambda \left(\frac{\sigma}{R}\right)^2], \quad (4)$$

где коэффициент пластичности раствора λ в условиях трехстороннего неравномерного сжатия практически существенно снижен. В качестве примера кривые деформирования двух цементных растворов М50 и М200 в каменной кладке под индексами "D" и "E", построенные по этой зависимости, приведены в графике на рис. 1, предельные относительные значения модулей деформаций которых E'_R при исчерпании сопротивления увеличены, соответственно, до 0,6 и 0,7 E_0 .

Выводы. Как показала обработка результатов многочисленных исследований [2, 3, 6–8, 11–19, 21, 22], этот прием дает наиболее близкое согласование теоретических и опытных результатов. Полученные результаты исследований позволяют более точно установить действительную прочность раствора в горизонтальных швах при сжатии кладки и тем самым добиться соответствующей экономии материалов. Дальнейшее проведение исследований в этом направлении будет способствовать созданию достоверной физической теории прочности кладки.

Источник финансирования: Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пангаев В.В., Сердюк В.М. О деформативных характеристиках цементных кладочных растворов // Известия Вузов. Строительство. 2014. №9. С. 110–113.
2. Донченко О.М., Дегтев И.А. Экспериментальные исследования деформирования и сопротивления кладки из силикатного кирпича на различных растворах при центральной сжатии // В сб.: Строительные конструкции и инженерные сооружения. Сборник трудов МИСИ, БТИСМ. М.: МИСИ. 1982. С. 3–10.
3. Донченко О.М., Дегтев И.А. К развитию теории трещиностойкости и сопротивления

кладки при сжатии // Известия Вузов. Строительство. 2000. №10. С. 16–20.

4. Поляков С.В. Длительное сжатие кирпичной кладки. М.: Госстройиздат, 1959. 183 с.

5. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1961. 175 с.

6. Гениев Г.А., Кисюк В.Н. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 204 с.

7. Донченко О.М., Пашенко Ж.Н. Современное состояние теории сопротивления и методов расчета кладки из искусственных камней // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 19–21.

8. Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н. Прочность и деформативность каменной кладки при силовом сжатии: монография. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. 137 с.

9. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.: ОНТИ, 1937. 291 с.

10. Донченко О.М., Аль-Хашими Омар Исмаел. Современное состояние теории сопротивления и методов расчета кладки из ячеистобетонных камней при сжатии / 2017 год глазами ученых: сб. научных трудов. Краснодар, 2018. С. 81–84.

11. Донченко О.М., Дегтев И.А. Деформации каменной кладки при центральном кратковременном сжатии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 44–46.

12. Дегтев И.А., Донченко О.М., Тарасенко В.Н. Разработка целесообразных технологических приемов изготовления каменных конструкций // Научно-технологические и инновации: сб. докл. Международной научно-практической конференции. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. ч. 2. С. 21–26.

13. Гастев В.А. О влиянии швов на сопротивление каменной кладки сжатию: монография. М.: Путь. 1924. 53 с.

14. Гениев Г.А. О критерии прочности каменной кладки при плоском напряженном состоянии // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. № 2. С. 7–11.

15. Дегтев И.А., Донченко О.М. Экспериментальное исследование прочности сцепления силикатного кирпича с раствором на полимерном вяжущем // Исследование строительных конструкций и сооружений: сб. тр. М.: МИСИ, БТИСМ, 1980. С. 16–21.

16. Дегтев И.А. Исследование влияния толщины горизонтальных швов на прочностные

свойства кладки из силикатного кирпича // Исследование работы строительных конструкций и сооружений: сб. научн. тр. М.: 1981. С. 22–25.

17. Донченко О.М., Дегтев И.А., Савченко В.И. Прочность и трещиностойкость кладки при центральном кратковременном сжатии // Расчет строительных конструкций и сооружений: сб. научн. тр. М.: 1983. С. 3–19.

18. Дегтев И.А. Практические методы расчета трещиностойкости и сопротивления кладки из различного вида камней и раствора // Исследование и разработка эффективных конструкций, методов возведения зданий и сооружений: межвузовский сб. научн. тр. Белгород: БелГТАСМ, 1996. С. 57–65.

19. Донченко О.М., Дегтев И.А. Влияние толщины растворных швов на прочность кладки при центральном сжатии // Качество, безопасность, энерго – и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительства на пороге XXI века: сб. докл. Международной научн. конф. Белгород: БелГТАСМ, 2000. Ч. 3. С. 83–88.

20. Котов И.Т. Влияние способа образования шва на работу кирпичной кладки // Экспериментальное исследование каменных конструкций: сб. научн. трудов. М.: Госстройиздат, 1939. С. 18–31.

21. Оноприенко Н.Н., Дегтев И.А., Донченко О.М. Использование цементно-полимерных растворов для повышения эффективности каменной кладки // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6.

22. Донченко О.М., Дегтев И.А. Деформации каменной кладки при центральном кратковременном сжатии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №3. С. 44–46.

23. Кожариков С.В. Свойства кладки из силикатного кирпича на растворах с жидкостекольным вяжущим // Строительство и архитектура Узбекистана. 1976. №6. С. 14–18.

24. Семенцов С.А. Некоторые особенности деформаций кирпичной кладки при сжатии и изгибе // Исследования по каменным конструкциям: сб. научн. тр. М.: Госстройиздат. 1949. С. 23–37.

25. Grunau E.B. Ziegelmauerwerk // Deutsche Bauzeitschrift. 1976. №5. Pp. 641–644.

26. Jain A.K. Tests on Brick couplets // Proc. Instn. Civil Engrs, 1978. XII, vol. 65. Pt. 2. Pp. 909–915.

Информация об авторах

Донченко Олег Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дегтев Илья Алексеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры архитектурных конструкций. E-mail: konststarrh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Тарасенко Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций. E-mail: vell.30@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жихарев Николай Дмитриевич, студент бакалавр. E-mail: nickzhikharev@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила в феврале 2019 г.

© Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Жихарев Н.Д., 2019

¹Donchenko O.M., ¹Degtev I.A., ^{1,*}Tarasenko V.N., ²Zhikharev N.D.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46

²Moscow State University of Civil Engineering
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

*E-mail: tarasenko.vn@bstu.ru

DEFORMATION OF HORIZONTAL JOINTS' MORTAR OF MASONRY UNDER COMPRESSION

Abstract. The necessity of establishing and determining the consistency of mortars deformation in the horizontal joints of masonry is established: in the absence and development of cracks and with the exhaustion of resistance ranging from 80 – 85 % of the total deformation of masonry under short-term compression. Attention is paid to the absence of reports in the scientific literature on the conduct and results of research on the spatial stress-deformative state of the mortar in the joints of masonry under compression. The advantages of studying the secant modulus of deformation E_p are emphasized in solving various issues in the theory of operation and method for calculating the masonry. On the basis of long-term research results, the essential difference between the change in the secant modulus of cement mortars deformation E'_p of varying strength of horizontal joints from the nature of its change when tested in standard samples is shown analytically and graphically. The advantages of the developed methodology for processing the results of investigations of mortars in standard samples are noted. It allows to more accurately set the actual values of normal strain modulus E_0 and the ultimate relative deformation under compression. The analytical dependences of the plasticity coefficient and the secant modulus of deformations E'_p are found based on processing the results of numerous studies of masonry mortars.

Keywords: strength, deformability, masonry, mortar, horizontal joints, compression, reduction of deformation modulus, spatial stress state, change of deformation modulus.

REFERENCES

1. Pangaev V.V., Serdyuk V.M. On deformation characteristics of cement masonry structures [O deformativnykh harakteristikah cementnykh kladochnykh rastvorov]. News Universities. Construction. 2014. No. 9. Pp. 110–113. (rus)
2. Donchenko O.M., Degtev I.A. Experimental researches of deformation and resistance of a laying from a silicate brick on various solutions at the Central compression [Eksperimental'nye issledovaniya deformirovaniya i soprotivleniya kladki iz silikatnogo kirpicha na razlichnykh rastvorah pri central'nom szhatii]. V sbornike Stroitel'nye konstrukcii i inzhenernye sooruzheniya. Sbornik trudov MISI, BTISM. 1982. Pp. 3–10. (rus)
3. Donchenko O.M., Degtev I.A. Development of the theory of fracture toughness and resistance of the masonry under compression [K razvitiyu teorii treshchinostojkosti i soprotivleniya kladki pri szhatii]. Proceedings of the Universities. Construction. 2000. No. 10. Pp. 16–20. (rus)
4. Polyakov S.V. Long compression of brickwork [Dlitel'noe szhatie kirpichnoj kladki]. M: Gosstroizdat, 1959. 183 p. (rus)
5. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete [Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona]. M: Gosstroizdat, 1961. 175 p. (rus)
6. Geniev G.A., Kisuk V.N. Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete [Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona]. M.: Stroizdat, 1974. 204 p. (rus)
7. Donchenko O.M., Pashchenko J.N. The current state of the theory of resistance and methods of

masonry from artificial stones [*Sovremennoe sostoyanie teorii soprotivleniya i metodov rascheta kladki iz iskusstvennykh kamnej*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. 4. Pp. 19–21. (rus)

8. Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N. The strength and deformability of masonry under compression force: monograph [*Prochnost' i deformativnost' kamennoy kladki pri silovom szhatii: monografiya*]. Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. 137 p. (rus)

9. Onishchik L.I. Strength and stability of stone structures [*Prochnost' i ustojchivost' kamennykh konstrukcij*]. M.: ONTI, 1937. 291 p. (rus)

10. Donchenko O.M., Al-Hashimi Omar Ismael. The current state of resistance theory and calculation methods for masonry from cellular concrete stones under compression [*Sovremennoe sostoyanie teorii soprotivleniya i metodov rascheta kladki iz yacheistobetonnykh kamnej pri szhatii*]. 2017 the eyes of scientists: collection of scientific works. Krasnodar, 2018. Pp. 81–84. (rus)

11. Donchenko O.M., Degtev I.A. Deformation of masonry at the Central short-term compression [*Deformacii kamennoy kladki pri central'nom kratkovremennom szhatii*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. 3. Pp. 44–46. (rus)

12. Degtev I.A., Donchenko O.M., Tarasenko V.N. The development of appropriate technological methods of manufacturing of stone structures [*Razrabotka celesoobraznykh tekhnologicheskikh priemov izgotovleniya kamennykh konstrukcij*]. Naukoemkie tekhnologii i innovacii: sb. dokl. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod: BGTU im. V. G. Shukhov. 2016. Part 2. Pp. 21 – 26. (rus)

13. Gastev V.A. On the influence of seams on the resistance of masonry compression: monograph [*O vliyanii shvov na soprotivlenie kamennoy kladki szhatiyu: monografiya*]. M.: Way. 1924. 53 p. (rus)

14. Geniev G.A. On the strength criteria of masonry at flat stress state [*O kriterii prochnosti kamennoy kladki pri ploskom napryazhennom sostoyanii*]. Construction mechanics and calculation of structures. 1979. 2. Pp. 7–11. (rus)

15. Degtev I.A., Donchenko O.M. Experimental investigation of the adhesion strength of Seeley brick with a solution of polymer binder. [*Eksperimental'noe issledovanie prochnosti scepheniya silikatnogo kirpicha s rastvorom na polimernom vyazhushchem*]. Issledovanie stroitel'nykh konstrukcij i sooruzhenij. M: IISS, BTIM, 1980. Pp. 16–21. (rus)

16. Degtev I.A. Research of influence of thickness of horizontal seams on the strength properties of masonry of silicate bricks [*Issledovanie vliyaniya tolshchiny gorizontal'nykh shvov na prochnostnye svoystva kladki iz silikatnogo kirpicha*]. Issledovanie raboty stroitel'nykh konstrukcij i sooruzhenij. Tr. M.: 1981. Pp. 22–25. (rus)

17. Donchenko O.M., Degtev I.A., Savchenko I.V. Strength and fracture toughness of masonry in the Central short-term compression [*Prochnost' i treshchinostojkost' kladki pri central'nom kratkovremennom szhatii*]. Raschet stroitel'nykh konstrukcij i sooruzhenij. Tr. M.: 1983. Pp. 3–19. (rus)

18. Degtev I.A. Practical methods of calculation of fracture toughness and resistance of masonry of various kinds of stones and mortar [*Prakticheskie metody rascheta treshchinostojkosti i soprotivleniya kladki iz razlichnogo vida kamnej i rastvora*]. Issledovanie i razrabotka ehffektivnykh konstrukcij, metodov vozvedeniya zdaniy i sooruzhenij: mezhvuzovskij sb. nauchn. tr. Belgorod: BelGTASM, 1996. Pp. 57–65. (rus)

19. Donchenko O.M., Degtev I.A. Effect of thickness of mortar joints on the strength of masonry under the Central compression [*Vliyanie tolshchiny rastvornykh shvov na prochnost' kladki pri central'nom szhatii*]. Kachestvo, bezopasnost', ehnergo- i resursosberezhenie v promyshlennosti strojmaterialov i stroitel'stva na poroge XXI veka: sb. dokl. Mezhdunarodnoj nauchn. konf. Belgorod: BelGTASM 2000. Part 3. Pp. 83–88. (rus)

20. Kotov I.T. The Influence of a method of forming a seam on the work of brick masonry [*Vliyanie sposoba obrazovaniya shva na rabotu kirpichnoj kladki*]. Eksperimental'noe issledovanie kamennykh konstrukcij: sb. nauchn. Trudov. M.: Gosstrojizdat. 1939. Pp. 18–31. (rus)

21. Onoprienko N.N., Degtev I.A., Donchenko O.M. The use of cement-polymer RAS-creators to improve the efficiency of masonry [*Ispolzovanie cementno-polimernykh rastvorov dlya povysheniya ehffektivnosti kamennoy kladki*]. Modern problems of science and education. 2012. No. 6. (rus)

22. Donchenko O.M., Degtev I.A. Deformation of masonry at the Central short-term compression [*Deformacii kamennoy kladki pri central'nom kratkovremennom szhatii*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 44–46. (rus)

23. Kosarikov S.V. Properties of a laying of a silicate brick in solutions with liquid glass binder [*Svoystva kladki iz silikatnogo kirpicha na rastvorah s zhidkostekol'nyim vyazhushchim*]. Architecture and Construction of Uzbekistan. 1976. 6. Pp. 14–18. (rus)

24. Sementsov S.A. Some features of the deformation of masonry under compression and bending [*Nekotorye osobennosti deformacij kirpichnoj kladki pri szhatii i izgibe*]. Issledovaniya po kamennym konstrukcijam: sb. nauchn. tr. M.: Gosstrojizdat. 1949. Pp. 23–37. (rus)

25. Grunau E.B. Ziegelmauerwerk. Deutsche Bauzeitschrift. 1976. No. 5. Pp. 641–644.

26. Jain A. K. Tests or Brick couple ts. Proc. Instn. Civil Engrs, 1978. XII, Vol. 65. Pt. 2. Pp. 909–915.

Information about the authors

Donchenko, Oleg M. PhD, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Degtev, Ilya A. Professor. E-mail: konstrarh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tarasenko, Viktoriya N. PhD, Assistant professor. E-mail: vell.30@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zhikharev, Nikolai D. Bachelor student. E-mail: nickzhikharev@yandex.ru. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Received in February 2019

Для цитирования:

Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Жихарев Н.Д. Деформации раствора горизонтальных швов каменной кладки при сжатии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 42–49. DOI: 10.34031/article_5ce292c9b184d5.39570191

For citation:

Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N., Zhikharev N.D. Deformation of horizontal joints' mortar of masonry under compression. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 42–49. DOI: 10.34031/article_5ce292c9b184d5.39570191

DOI: 10.34031/article_5ce292c9d48174.48469908

¹Иконников С.Ю., ^{1*}Блажнов А.А.¹Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина
Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69

*E-mail: blazhnov47@mail.ru

КОРРОЗИЯ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЕ ШАМПИНЬОННИЦЫ

Аннотация. Обобщение опыта строительства зданий для выращивания шампиньонов показало многообразие их строительных решений. Установлено, что в шампиньонницах каркасной конструктивной схемы ограждающие конструкции производственных помещений экономически целесообразно выполнять методом послойной сборки с обшивками из оцинкованной стали и алюминиевых сплавов. Однако технологически требуемый мокрый влажностный режим воздушной среды помещений и содержащиеся в ней агрессивные газы при строительном проектировании осложняют выбор рационального типа наружных слоёв ограждающих конструкций. Для выявления рационального материала обшивок в производственных помещениях шампиньонницы проводились коррозионные испытания образцов алюминиевых сплавов систем Al – Mg, Al – Mn, Al – Mg – Si, технического алюминия, оцинкованной стали и оцинкованной стали с защитным покрытием. Для экспонировавшихся образцов установлены вид и скорость проникновения коррозии. По результатам испытаний определены целесообразные материалы обшивок для различных видов производственных помещений шампиньонницы.

Ключевые слова: шампиньонница, агрессивная среда, металлические образцы, коррозионные испытания.

Введение. Как показали натурные обследования шампиньонных комплексов, ограждающие конструкции производственных помещений отечественных (не импортной поставки) шампиньонниц выполнены из различных материалов и изделий: керамического кирпича, бетонных блоков, железобетонных плит, стеклопластиковых и асбестоцементных экструзионных панелей [1]. Строительные решения помещений обусловлены агрессивной воздушной средой, создаваемой выделениями из используемого сырья и технологически требуемым влажностным режимом [2, 3]. Исследование воздушной среды производственных помещений показало, что ограждающие конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям влаги ($\varphi = 85\text{--}100\%$), повышенных температур на отдельных стадиях технологического процесса (до $60\text{--}70^\circ\text{C}$) и агрессивных газов: аммиака, окислов азота, сероводорода, углекислого газа.

Проведенные технико-экономические расчёты показали, что наиболее экономичным решением ограждающих конструкций является их послойная сборка: наружные слои – листы из оцинкованной стали или алюминиевых сплавов, средний слой – лёгкий утеплитель, например, URSA. Для определения коррозиестойких типов обшивок признано целесообразным проведение натурных испытаний металлических образцов материалов, рекомендуемых СП 72.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» и СП 128.13330.2012 «Алюминиевые конструкции» для применения в

ограждающих конструкциях производственных помещений.

Методология. Планирование и проведение натурных коррозионных испытаний образцов осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ Р 9.905-2007 «Методы коррозионных испытаний. Общие требования» и ГОСТ 9.908-85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости». Цель испытаний заключалась в определении исходных данных (глубины и скорости проникновения коррозии, вероятной долговечности обшивок) для обоснования целесообразного решения обшивки по каждому виду помещений. Принятая продолжительность испытаний позволяла по их результатам однозначно определить поведение образцов.

Основная часть. Технологический процесс промышленного выращивания шампиньонов состоит из трёх основных стадий: пастеризации субстрата, состоящего из влажной смеси соломы и куриного помёта; проращивания грибов в субстрате; выращивания грибов. Параметры воздушной среды для каждой стадии процесса, установленные по результатам замеров, приведены в табл. 1. Для определения концентрации агрессивных газов использовались газоанализаторы УГ-2 и Riken Keiki (Model – Ri 501A).

Из данных табл. 1 следует, что в период пастеризации субстрата воздушная среда помещения является наиболее агрессивной к ограждающим конструкциям. Во время проращивания грибов и роста грибов воздушная среда имеет

примерно равные параметры и степень её агрессивности практически одинакова.

Таблица 1

Параметры воздушной среды по стадиям процесса

Стадия процесса	Параметры воздушной среды						
	влажность, %	температура, °C	вид и концентрация газов, мг/м ³				
			аммиак	углекислый газ	диоксид азота	сероводород	окись углерода
пастеризация субстрата	95–100	60–48	300–7	> 2000	0,16–0,60	0,24–0,48	12–25
проращивание грибницы	90–95	22–25		> 2000			
выращивание грибов	85–90	15–18		≈ 1800			

Для определения рационального материала металлических обшивок в течение двух лет проводились натурные коррозионные испытания их образцов в двух видах помещений: для пастеризации субстрата и для проращивания грибницы и выращивания грибов. Экспонировались образцы

размерами 150×50×1 мм из стали с нанесённым горячим способом цинковым покрытием толщиной 40 мкм и алюминиевых сплавов систем Al-Mg-Si (АД31Т5), Al-Mn (АМцН2), Al-Mg (АМг2М, АМг2Н2) и технического алюминия (АД1М) (табл. 2).

Таблица 2

Результаты коррозионных испытаний образцов

Сплав	Размеры коррозионных поражений за период испытаний				Характер коррозии
	глубина поражения, мкм		штук на см ² (в среднем)	% пораженной поверхности	
	максимальная	средняя			
Помещение проращивания грибницы и выращивания грибов					
АД1М	—	—	—		сплошная равномерная
АМг2М	105	49	2,43	0,5 питтинг	питтинг, биокоррозия до 20 % площади
АМг2Н2	117	56	1,81	0,3питтинг	питтинг, биокоррозия менее 1 % площади
АД31Т5	160	62	4,0	0,9 питтинг	питтинг, отдельные очаги отслоений
АМцН2	10	—	—	2,0	отдельные очаги расслаивающей коррозии
оцинкованная сталь	—	—	—		сплошная равномерная, белые продукты разрушения цинка на поверхности
Помещение пастеризации субстрата					
АД1М	—	—	—		сплошная равномерная
АМг2М	—	—	—		сплошная равномерная
АМг2Н2	—	—	—		сплошная равномерная
АД31Т5	—	—	—		сплошная равномерная
АМцН2	—	—	—		сплошная равномерная
оцинкованная сталь	—	—	—		сплошная равномерная, белые продукты разрушения цинка на поверхности

Также испытывались образцы из оцинкованной стали с эпоксидным покрытием ЭП-140 (помещение пастеризации субстрата) и из оцинкованной стали с нанесённой по грунтовке ЭП-0200

полиэфирсиликоновой эмалью МЛ-1202 (помещение выращивания грибов). Часть образцов из сплава АМг2М анодировали для оценки коррозионной стойкости покрытия. Съём всех образцов

для выявления кинетики их коррозионного разрушения проводили через 6 мес., количество образцов на каждую точку (съем) составляло 4 шт. В соответствии с ГОСТ 9.908-85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» основным количественным показателем коррозионной стойкости при равномерной (сплошной) и питтинговой коррозии является время проникновения коррозии на допустимую глубину. В связи с этим для равномерной коррозии рассчитывалась средняя скорость ее проникновения (мкм/год), а для питтинговой – подбирались уравнения для экстраполяции во времени максимальной глубины проникновения точечных поражений. Глубина и диаметр питтингов измерялись микроскопом МИМ-7, для подсчета их числа на поверхности

использовался бинокулярный микроскоп МБС-2.

Почти во всех исследованных образцах, кроме образцов из сплавов АД31Т5 и АМг2Н2 в помещении проращивания грибки и выращивания грибов, процесс коррозии протекал с замедлением во времени, что в основном обусловлено образованием продуктов коррозии, препятствующих взаимодействию участков металла, подвергнутого разрушению, с агрессивной средой [4, 5]. Наиболее интенсивно процесс коррозии протекал в помещении пастеризации субстрата (рис. 1). За период испытаний скорость проникновения коррозии в цинковое покрытие в среднем составила 2,3 мкм/год (среднеагрессивная среда), для алюминиевых сплавов этот показатель к окончанию исследования составлял 0,3 – 0,4 мкм/год.

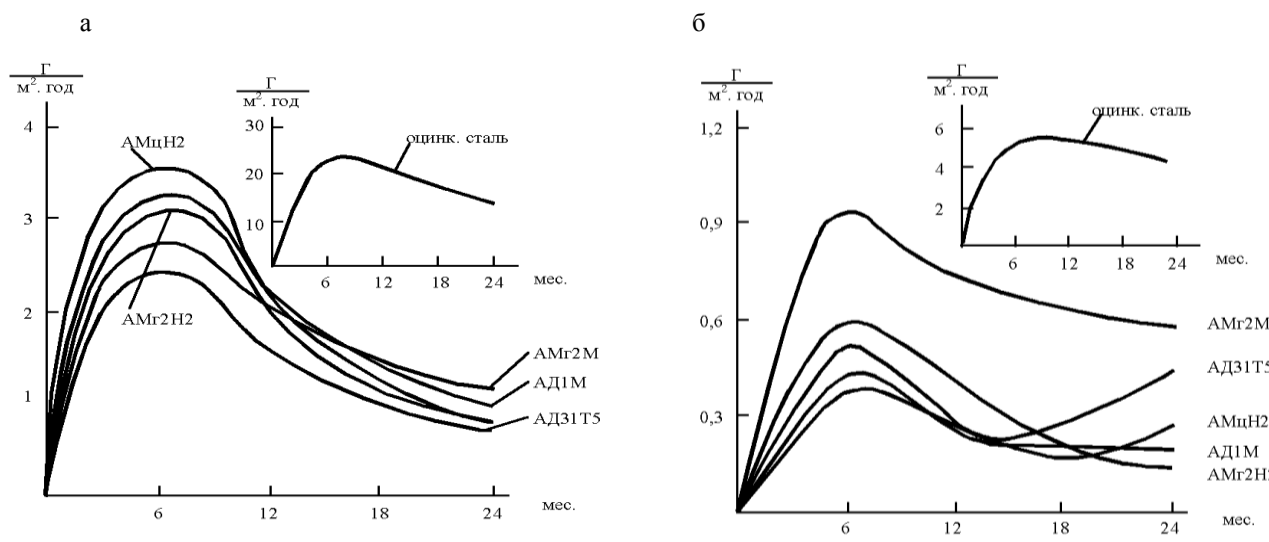


Рис. 1. Скорость коррозии образцов в помещении пастеризации субстрата (а) и выращивания грибов (б)

В помещении проращивания грибки и выращивания грибов средняя скорость проникновения коррозии в оцинкованную сталь составила 0,65 мкм/год. На алюминиевые сплавы среда помещения влияла различно. У сплавов АД31Т5 и АМцН2 после 12 месяцев испытания отмечена начальная стадия расслаивающей коррозии, идущей без торможения во времени. Отдельные очаги расслаивающей коррозии глубиной до 10 мкм у сплава АМцН2 можно объяснить его нагартовкой [5], так как в отожжённом состоянии (АМцМ) сплав обладает высокой коррозионной стойкостью [6]. Такое местное отслаивание может повлиять на долговечность обшивок и ухудшить их декоративный вид. У сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Si выявлена питтинговая (точечная) коррозия, свойственная алюминиевым сплавам в определённых средах [7, 8]. Предпочтительными местами возникновения питтинга являются гра-

ницы зёрен и включения [9]. Максимального развития питтинговая коррозия достигает к концу второго года испытаний, а затем увеличение глубины поражений существенно замедляется [10]. Затухание процесса на многих участках связано и с взаимодействием питтингов между собой, сокращающем «жизненное пространство» слабых питтингов [11]. Известно, что из всех промышленных алюминиевых сплавов сплавы Al-Mg с содержанием магния не более 3 % имеют наилучшее сопротивление питтинговой коррозии и самую низкую скорость распространения язв [6].

Для определения глубины питтинга во времени может быть использована зависимость (Синяевский В.С. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986.368с)

$$h = k\tau^{1/n}, \quad (1)$$

где h – максимальная глубина питтинга; n и k – константы; τ – время.

Статистической обработкой результатов испытаний образцов [12] установлены зависимости глубины точечного поражения h , мкм, от времени τ , мес, позволяющие прогнозировать её развитие.

Так, для сплавов

$$\text{AMg2M: } h = 44,28\tau^{0,272} \quad (2)$$

$$\text{AMg2H2: } h = 33,44\tau^{0,39} \quad (3)$$

$$\text{AD31T5: } h = 83,26\tau^{0,21} \quad (4)$$

Формула (4) выведена без учёта коррозионных потерь массы образцов от расслаивающей коррозии. На основании полученных зависимостей расчётная глубина питтинга за 50 лет не превышает 0,5 мм.

У сплавов AMg2M и AMg2H2 также отмечена биологическая коррозия в виде неглубоких червеобразных поражений, причём сплав AMg в отожжённом состоянии более подвержен этому виду коррозии (~ 20 % поверхности). Биокоррозии подвержены углеродистые стали, легированные стали и цветные металлы [13]. Известно несколько групп бактерий и плесневых грибов, повреждающих металлы [14]. Однако из двух указанных видов коррозии в нашем случае определяющей является питтинговая. У сплава AD1M в помещении проращивания грибницы и выращивания грибов скорость проникновения сплошной равномерной коррозии составляла 0,07–0,08 мкм/год, что характеризует его как весьма стойкий материал [15].

Испытания образцов из покрытой эпоксидной грунтовкой ЭП-140 оцинкованной стали в пастеризационном помещении дали неудовлетворительные результаты: при неизменённом внешнем виде покрытия адгезия равнялась 4 баллам по ГОСТ 31149-2014 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза», прочность плёнки при обратном ударе равнялась нулю. В помещении проращивания грибницы и выращивания грибов эмаль МЛ-1202 на оцинкованных образцах не изменила внешнего вида, адгезия покрытия не ухудшилась (1 балл), его прочность при обратном ударе равнялась 500 Н·см. Анодно-окисное покрытие толщиной 15–20 мкм на образцах из сплава AMg2M полностью предотвращало их коррозию.

Выводы. Процесс коррозии почти всех испытанных образцов в производственных помещениях шампиньонницы протекал с затуханием во времени. Скорость сплошной равномерной коррозии цинкового покрытия в 2–6 раз превышала аналогичную скорость коррозии алюминиевых сплавов.

В ограждающих конструкциях помещения пастеризации субстрата возможно применение обшивок из алюминиевых сплавов АД1М, АМг2М, АМцМ толщиной 1 мм без защиты. Применение обшивок из оцинкованной стали без защиты от коррозии не рекомендуется.

В помещении проращивания грибницы и выращивания грибов в ограждающих конструкциях возможно применение обшивок из оцинкованных листов, защищённых нанесённой по грунтовке ЭП-0200 полиэфирсилоконовой эмалью МЛ – 1202, а также обшивок из алюминиевых сплавов АД1М, АМг2М, АМг2Н2, АМцМ толщиной 1 мм без защиты от коррозии.

Анодирование может быть рекомендовано как защита от питтинговой, равномерной и биологической коррозии алюминиевых сплавов в помещениях проращивания грибницы и выращивания грибов. Толщина анодно-окисного покрытия, предпочтительно с бихроматным наполнением, 15–20 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блажнов А.А. Основы формирования шампиньонных комплексов и их производственных зданий: монография. Орёл: Орёл-ГАУ, 2015. 202с.
2. Блажнов А.А. Основы формирования комплекса по производству шампиньонов на промышленной основе [Электронный ресурс] // Архитектон: известия вузов. 2014. №46. URL: <http://archvuz.ru/2014/2/7> (25.02.2019)
3. Лысенко В.П. Куриный помет – побочная продукция птицефабрик // Птица и птицепродукты. 2013. №5. С. 65–67.
4. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Альянс, 2014. 472с.
5. Коррозия: справочник. Под ред. Л.Л. Шрайера [пер. с англ.]. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
6. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. Edited by J.R. Davis. ASM International, 1999. 313p.
7. Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Румянцева К.Е., Балмасов А.В., Чекунова М.Д. Антикоррозионная защита металлов. Иваново: ИГХТУ, 2009. 187 с.
8. Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов. Под ред. Джозефа Р. Дейвиса [пер. с англ.]. М.: НП «АПРАЛ», 2016, 315с.
9. Пахомов В.С. Коррозия металлов и сплавов: справочник, в 2т. М.: Наука и технология, 2013. Т.1. 448 с.
10. Cristian Vargel. Corrosion of Aluminum. ELSEVIER, 2004. 658 p.
11. Кайдаров Р.А. Электрохимические ме-

тоды исследования локальной коррозии пассивирующихся сплавов и многослойных систем: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 144 с.

12. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ [пер. с англ.]. М.: Диалектика, 2016. 912 с.

13. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Курс М.Г., Бухарев Г.М. Опыт исследований биокоррозии металлов // Практика противокоррозионной защиты. 2016. № 2(80). С. 36–57.

14. Колесникова Н.Н., Луканина Ю.К., Хватов А.В., Лихачёв А.Н., Попов А.А., Заиков Г.Е., Абзальдинов Х.С. Биологическая коррозия металлических конструкций и защита от неё // Вестник Казанского технологического университета. 2013. С. 170–174.

15. Жарский И.М., Иванов М.П., Куис Д.В., Свидуневич Н.А. Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования. Минск: Вышэйша школа, 2012. 303 с.

Информация об авторах

Иконников Сергей Юрьевич, аспирант очной формы обучения кафедры надёжности и ремонта машин. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д.69.

Блажнов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры агропромышленного и гражданского строительства. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В.Парахина, Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д.69.

Поступила в февраль 2019 г.

© Иконников С.Ю., Блажнов А.А., 2019

¹*Ikonnikov S.Yu.*, ^{1*}*Blazhnov A.A.*

¹*Oryol State Agrarian University named after N.V.Parakhin
Russia, 302019, Orel, st. General Rodina, 69*

**E-mail: blazhnov47@mail.ru*

CORROSION OF GALVANIZED STEEL AND ALUMINUM ALLOYS IN THE INDUSTRIAL ENVIRONMENT OF CHAMPIGNON

Abstract. Generalization the experience building for the cultivation of champignons shows the diversity of construction solutions. The method of layer-by-layer assembly with galvanized steel and aluminum alloy coverings is economically feasible to use in champignons of frame structural scheme, enclosing structures of industrial premises. However, the technologically required wet air conditions of the premises and aggressive gases during construction design complicate the selection of a rational type of outer layers of enclosing structures. To reveal the rational material of coverings in the production premises of champignons, corrosion tests are carried out on samples of aluminum alloys of the Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg-Si systems, technical aluminum, galvanized steel and galvanized steel with a protective coating. The type and corrosion penetration rate are set for the exposed samples. According to the test results, suitable covering materials for various types of champignon production premises are determined.

Keywords: champignon production premises, aggressive environment, metal samples, corrosion tests.

REFERENCES

1. Blazhnov A.A. Bases of formation of champignons complexes and industrial buildings [Osnovy formirovaniya shampin'onnykh kompleksov i ih proizvodstvennykh zdaniy: monografiya]. Orel: Orel State Agrarian University, 2015. 202 p. (rus)

2. Blazhnov A.A. Basics of the formation of a complex for the production of champignons on an industrial basis [Osnovy formirovaniya kompleksa po proizvodstvu shampin'onov na promyshlennoy osnove]. Architecton: News of Higher Educational Institutions, 2014. No. 46. Available at: <http://archvuz.ru/2014/2/7> (accessed 25.02.2019). (rus)

3. Lysenko V.P. Chicken dung – by-products of poultry farms [Kurinyj pomet – pobochnaya

produkcija pticefabrik]. Poultry and poultry products. 2013. №5. Pp. 65–67. (rus)

4. ZHuk N.P. Course of the theory of corrosion and protection of metals [Kurs teorii korrozii i zashchity metallov]. M.: Alliance. 2014, 472 p. (rus)

5. Corrosion: reference book. Edited by L. Shrayner [translated from English]. M.: Metallurgy, 1981. 632 p.

6. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. Edited by J.R. Davis. ASM International, 1999. 313 p.

7. Fedosova N.L., Rumyantseva V.E., Rumyantseva K.E., Balmasov A.V., Chekunova

M.D. Anticorrosion protection of metals [*Antikorroziionnaya zashchita metallov*]. Ivanovo: IGHTU, 2009. 187 p. (rus)

8. Corrosion of aluminum and aluminum alloys. Edit. by Joseph R. Davis [trans. from English]. M.: NP "APRAL", 2016, 315p.

9. Pahomov V.S. Corrosion of metals and alloys: a reference book [*Korroziya metallov i spлавov: spravochnik*]. M.: Science and Technology. 2013. Vol. 1. 448 p. (rus)

10. Cristian Vargel. Corrosion of Aluminium. ELSEVIER, 2004.658 p.

11. Kajdarov R.A. Electrochemical methods for the study of local corrosion of passivating alloys and multilayer systems: a monograph [*Elektrohimicheskie metody issledovaniya lokal'noj korrozii passiviruyushchih spлавov i mnogoslojnyh sistem: monografiya*]. Kazan: Publishing House

KNRTU. 2013, 144 p. (rus)

12. Drejper N., Smit G. Applied regression analysis. M.: Dialectics, 2016. 912 p.

13. Laptev A.B., Lucenko A.N., Kurs M.G., Buharev G.M. Experience in research on the biocorrosion of metals. Practice of anticorrosive protection. 2016. No. 2 (80). Pp. 36–57.

14. Kolesnikova N.N., Lukanina YU.K., Hvatov A.V., Lihachyov A.N., Popov A.A., Zaikov G.E., Abzal'dinov H.S. Experience in research on the biocorrosion of metals. Practice of anticorrosive protection. 2016. No. 2 (80). Pp. 36–57.

15. Zharskij I.M., Ivanov M.P., Kuis D.V., Svidunovich N.A. Corrosion and protection of metal structures [*Korroziya i zashchita metallicheskih konstrukcij i oborudovaniya*]. Minsk: Vyshehjskaja shkola. 2012, 303 p. (rus)

Information about the authors

Ikonnikov, Sergey Yu. Postgraduate student. Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin. Russia, 302019, Orel, st. General Rodina, 69.

Blazhnov, Aleksander A. PhD, Assistant Professor. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin. Russia, 302019, Orel, st. General Rodina, 69.

Received in February 2019

Для цитирования:

Иконников С.Ю., Блажнов А.А. Коррозия оцинкованной стали и алюминиевых сплавов в производственной среде шампиньонницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 50–55. DOI: 10.34031/article_5ce292c9d48174.48469908

For citation:

Ikonnikov S.Yu., Blazhnov A.A. Corrosion of galvanized steel and aluminum alloys in the industrial environment of champignon. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 50–55. DOI: 10.34031/article_5ce292c9d48174.48469908

DOI: 10.34031/article_5ce292ca089623.21062637

^{1,*}Николюкин А.Н., ¹Ярцев В.П., ¹Коломникова И.И.¹Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112

*E-mail: valax1@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ

Аннотация. Армированный бетон является одним из самых распространенных материалов в строительстве. Конструкции из данного материала обладают высокой несущей способностью, хорошо воспринимают динамические и статические нагрузки. Это обеспечивается за счет сцепления между арматурным стержнем и бетоном. Величина сцепления формируется из ряда различных факторов, образуемых в области условной поверхности взаимодействия арматуры с бетоном. Под условностью подразумевается то, что даже в случае использования любой арматуры происходит сопряжение материалов по поверхности, которая может разрушаться в зависимости от нагрузки. Нарушение сцепления вызывает значительные деформации конструкции, что впоследствии ведет к потере несущей способности элемента. Поэтому возникает необходимость в изучении величины сцепления между бетоном и арматурой при различных воздействиях. В данной статье описаны результаты численного эксперимента испытания на выдергивание стеклопластиковой арматуры периодического профиля из бетона. Построена математическая модель, позволяющая изучить накопление дефектов и разрушение арматуры в области заделки в бетон. Рассмотрены результаты численных исследований.

Ключевые слова: бетон, стеклопластиковая арматура, сцепление, вырыв, математическая модель, разрушение.

Введение. Изучение процесса сцепления стержня с бетоном путем проведения исследований на выдергивание арматуры зависит от поставленных задач. Так, напряженно-деформированное состояние у образцов, применяемых при испытании на вырыв, во многом зависит от их форм и размеров. При этом наблюдается различное перераспределение напряжений между арматурой и бетоном [1].

С точки зрения теории, идеальным условием для проведения испытаний на выдергивание арматурных стержней из материала является отсутствие собственных напряжений в композите [2]. Однако, в практике подобный случай можно встретить крайне редко, поскольку при эксплуатации конструкций в материале наблюдается возникновение сжимающих или растягивающих усилий различной величины. С помощью данного метода становится возможным определение основных характеристик сцепления, например, радиуса активного взаимодействия, момента образования первых трещин, разрушения бетонной поверхности и др.

Овчинникова И.Г. [3] в своих исследованиях установила, что в результате испытаний на выдергивание арматуры из опертых на торец призм наблюдается образование сопоставимых между собой деформаций стержня в материале. При этом необходимо учитывать такой фактор как укорочение бетона по длине призмы, появление которого связано с действием реактивных сил.

Решение задач, связанных с проведением исследований на выдергивание арматуры из призм, уложенных в бетонном массиве, оказалось достаточно сложным. Это объясняется тем, что под влиянием окружающего массива наблюдается стремительное развитие деформаций образца и его разрушение.

К существенным недостаткам данного метода можно отнести большую трудоемкость работ и невозможность установить точный характер разрушения в области заделки, а также необходимость создания опор для опирания и закрепления устройств. Поэтому для решения данной проблемы произведен численный эксперимент в пакете ANSYS 19.0 Workbench.

Методология. Сцепление образцов стеклопластиковой арматуры с бетоном определялось с помощью испытания на вырыв из бетонных кубов с ребром 100 мм согласно ГОСТ 31938-2012. Все образцы твердели и набирали прочность в нормальных условиях (90 сут., $t=20\pm 2$ °C, $w=65$ %). Длина заглубления образцов в бетон принималась равной $l/d=5$ мм. Перемещение стержня относительно бетона фиксировалось индикатором с точностью до 0,001 мм, установленным на нагруженном конце стержня. Также для образцов В25 проведены испытания с циклами замораживания-оттаивания согласно ГОСТ 10060-2012 [4].

После проведения испытания на вырыв проводились визуальные исследования для установления характера разрушения и накопления дефектов у арматуры и бетона в области заделки.

Численное моделирование НДС в контактном слое в пакете ANSYS 19.0 Workbench проводилось

на основе результатов механических испытаний арматуры и бетона согласно ГОСТ 31938-2012 [5], ГОСТ 24452-80 [6].

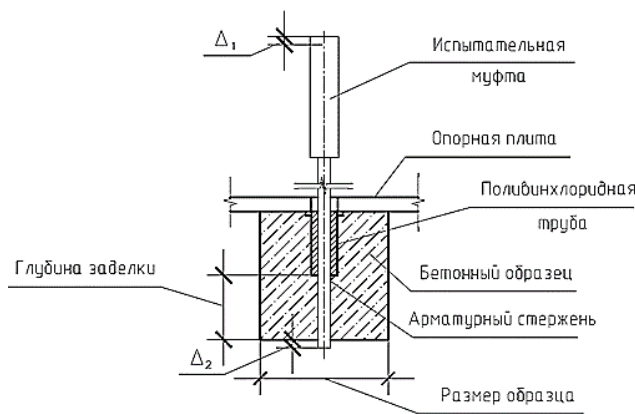


Рис. 1. Схема образца для испытания на выдергивание



Модель. Разработанная модель состоит из нелинейных материалов, поэтому для ее реализации требуется использовать аппарат вычислительной механики. На данный момент самым распространенным и удобным является МКЭ. Следует отметить возможность решения механики твердого деформирующего тела с учетом нелинейности работы материала. Поэтому метод конечных элементов получил широкое применение в современной практике проектирования, что в свою очередь положило начало разработки программных комплексов на его основе. Примером таких комплексов могут выступить ABAQUS, MARC, ANSYS и др.

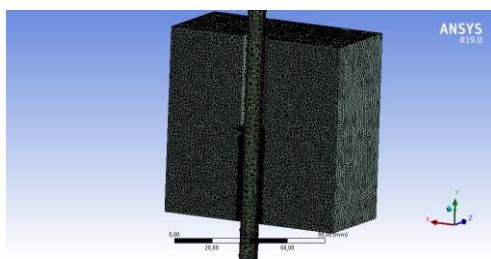


Рис. 2. Расчетная КЭ модель

В данной работе численное решение задачи сцепления композитного стержня с бетоном производилось на базе комплекса ANSYS 19.0 Workbench [7].

В качестве модели бетона принята модель Menetrey-Willam [8–10], основанная на поверхности пластичности Уиллама-Варнке, включающей зависимость от трех независимых инвариантов тензора напряжений.

Поверхность пластичности Уиллама-Варнке отличается от поверхности Мора-Кулона отсутствием острых краев, которые могут вызвать

трудности в решении поверхностного напряжения Мора-Кулона. Также она обладает некоторыми характеристиками, свойственными модели Drucker-Prager [8], и может моделировать аналогичные материалы. Модель Menetrey-Willam [9] лучше всего подходит для моделирования поведения связанных инертных материалов.

Основная часть.

Композитная арматура

При задании физико-механических характеристик СПА учитывается тот факт, что роулинг стержня по структуре является ортотропным материалом [7]. Для этого в качестве описания работы массива стеклопластиковой арматуры выполнялось использование модели материала Orthotropic Elasticity, которая базируется на формуле (1), но имеет разнообразную матрицу жесткости материала. Так как в плоскости СПА существует вторая плоскость симметрии, будет существовать и матрица жесткости, принимающая вид:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & -\frac{\nu_{22}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где E_{ij} – модуль упругости, соответствующий направлению материала; G_{ij} – модуль сдвига; ν_{ij} – коэффициент Пуассона.

Прочность СПА при НДС может быть оценена различными критериями, которые непосредственно могут выявить вероятную схему или

механизм разрушения, например, указать, разрушение будет происходить по матрице или по волокну [11]. Поэтому каждому применённому критерию прочности можно присвоить коэффициент, который покажет приоритет в анализе разрушения материала. Так, например, при растяжении СПА более вероятно разрушение внешнего

волокна, поэтому критерию следует присвоить более высокий коэффициент прочности на разрушение волокна.

В пример можно привести применение коэффициентов весовых критериев максимальных напряжений:

$$f = \max \left(\left| w_1 \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| w_2 \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| w_3 \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| w_{12} \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| w_{13} \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| w_{23} \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right) \quad (2)$$

где $w_1, w_2, w_3, w_{12}, w_{13}, w_{23}$ – весовые коэффициенты; X, Y, Z – предел прочности материала на одноосное растяжение или сжатие; R, S, Q – предел прочности материала на сдвиг.

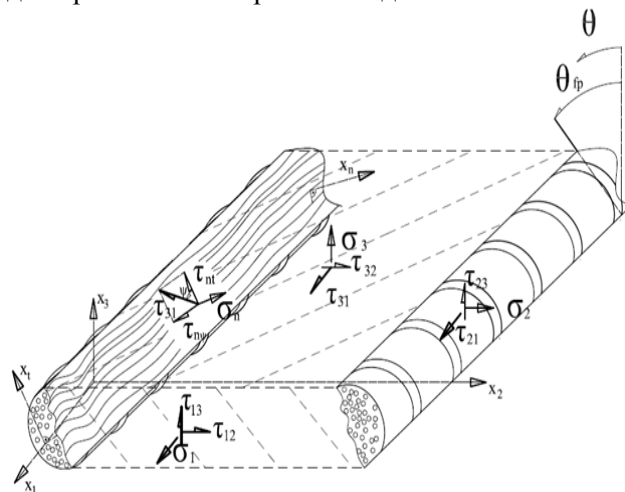


Рис. 3. Напряжения в параллельных волокнах основного стержня СПА

В данной работе критерием прочности выступает значение А. Рукс, так как оно в должной степени подходит для описания армированного композитного материала с учетом ряда важных факторов, таких как разрушение фибры арматуры, расслоение материала и межволоконное разрушение внутри материала.

Разрушение волокна СПА

Случай разрушения волокна внутри СПА описывается простым критерием А. Рукс, а оценка прочности материала происходит по 2

критериям – на прочность и на деформацию (формулы 3 и 4):

$$f_f = \frac{\sigma_1}{X} = 1 \text{ если } \sigma_1 \geq 0 \\ \text{то } X = X_t, \sigma_1 < 0 \text{ то } X = X_c \quad (3)$$

$$f_m = \frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon} = 1 \text{ если } \sigma_1 \geq 0 \\ \text{то } X_\varepsilon = X_{\varepsilon t}, \sigma_1 < 0 \text{ то } X_\varepsilon = X_{\varepsilon c} \quad (4)$$

Если же разрушение наступает без предшествующих заметных деформаций волокна, то в качестве предельного состояния будет считаться разрушение по максимальным напряжениям [12].

Если рассматривать разрушение матрицы материала, то зависимость примет вид:

$$f_m = \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 + \left(\frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 \quad (5)$$

Как и во многих критериях, разрушением считается момент, когда относительная прочность достигает единицы. Поэтому функция принимает вид:

$$f_m = \max(f_f, f_m) \quad (6)$$

Межволоконное Разрушение СПА

Для описания межволоконного разрушения СПА был использован критерий А. Рукс, учитывающий два тензора напряжения (σ_2, τ_{21}), которые описывают разрушение в пространственной постановке задачи. Сам механизм разрушения в трехмерной форме можно описать следующими формулами:

$$\sigma_n \geq 0 \text{ то } f_E = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_{\perp}^+} - \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n \quad (7)$$

$$\sigma_n < 0 \text{ то } f_E = \sqrt{\left[\left(\frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n \quad (8)$$

$$\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi = \frac{\tau_{nt}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{n1}^2} \quad (9)$$

$$R_{\perp\perp}^A = \frac{R_{\perp\perp}^-}{2(1+p_{\perp\perp}^-)} \quad (10)$$

Критерий прочности А. Рукс состоит из следующих параметров сопротивления разрушению (критерия разрушения): $R_{\perp\parallel}^+, R_{\perp\perp}^+, R_{\perp\psi}^+, R_{\perp\psi}^-$,

где $R_{\perp\perp}^+, R_{\perp\perp}^-$ устанавливают точки пересечения кривой с осью σ , что соответствует разрушению; $R_{\perp\parallel}^A$ устанавливает точку пересечения с

осью τ_{12} ; R обозначает параметры сопротивления разрушению; p обозначает параметры наклона разрушения в последнем пресечении; $\perp$ и $\parallel$ обозначают перпендикулярность и параллельность волокну соответственно [11].

Из приведенных выше уравнений, функция критерия разрушения формируется в плоскости разлома (действия) с использованием соответствующих напряжений и деформаций. Формулировки напряжений σ_n , τ_{nt} и τ_{n1} в произвольной плоскости с углом наклона θ [11]:

$$\sigma_n = \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \theta + 2\tau_{23} \sin \theta \cos \theta \quad (11)$$

$$\tau_{nt} = (\sigma_3 - \sigma_2) \sin \theta \cos \theta + \tau_{23}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (12)$$

$$\tau_{n1} = \tau_{31} \sin \theta + \tau_{21} \cos \theta \quad (13)$$

Чтобы найти фактор воздействия стресса f_E , требуется установить угол θ , так как разрушение

будет происходить под этим углом. Аналитическое решение для угла разлома доступно только для плоского состояния напряжений. Предполагается, что константы связаны с прочностными характеристиками СПА:

$$\frac{p_{\perp\perp}^-}{R_{\perp\perp}^A} = \frac{p_{\perp\parallel}^-}{R_{\perp\parallel}^A} \quad (14)$$

Что в дальнейшем приводит к функции вида:

$$f_E(\theta) = \begin{cases} \arccos\left(\sqrt{\frac{-R_{\perp\perp}^A}{-\sigma_2}}\right) & \text{если } \sigma_2 < -R_{\perp\perp}^A \\ 0 & \text{если } \sigma_2 \geq -R_{\perp\perp}^A \end{cases} \quad (15)$$

А. Риск в своей работе отмечал [11], что последний критерий был использован в качестве критерия для определения расслоения с применением дополнительного коэффициента ослабления $f_w^{if} = 0,8$, что в конечном итоге приводит к зависимости следующего вида:

$$\frac{1}{f_w^{if}} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_{\perp\perp}^A} - \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A}\right) \sigma_n\right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 + \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n} = 1 \quad \text{при } \sigma_n \geq 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{f_w^{if}} \sqrt{\left[\left(\frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A}\right) \sigma_n\right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 + \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n} = 1 \quad \text{при } \sigma_n < 0 \quad (17)$$

Режим активного отказа зависит от угла фракции θ и знака σ_n . Расслоение может произойти в том случае, когда σ_n положительная и θ составляет 90 градусов. Режимы разрушения, расслоения и скручивания волокон происходят с отрицательным σ_n .

Для слоев СПА выявлены следующие значения констант: $p_{\perp\perp}^- = 0,18$; $p_{\perp\parallel}^- = 0,18$;

$$p_{\perp\perp}^+ = 0,24$$

$$p_{\perp\parallel}^+ = 0,285$$

Влияние параллельных напряжений волокон на межволоконное разрушение

Учитывая, что некоторые волокна могут разрушиться уже при одноосных нагрузках, которые значительно меньше максимальных нагрузок,

вызывающих конечные разрушения (что можно считать деградацией материала), для параметров прочности могут быть введены ослабляющие факторы f_w . А. Риск сформулировал отношение степенного закона в [11]:

$$f_w = 1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1-D}}\right)^n \quad (18)$$

где $\sigma_{1-D} = \pm \xi X_t$,

Однако, установить ξ и n не составляло возможности. Был выбран второй вариант описания процесса деградации, который производился с помощью эллиптической функции:

$$c_{line} = \frac{f_{E0}}{\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)}; a_{ellipse} = \frac{1-s}{\sqrt{1-M^2}} \quad (19)$$

$$q = \frac{s}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2} + \sqrt{\left(\frac{s}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2}\right)^2 - \frac{s^2 - a_{ellipse}^2}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2}} \quad (20)$$

Впоследствии коэффициент силового воздействия принимает вид [11]:

$$f_{E0} = \frac{\left(\frac{|\sigma_1|}{X}\right)}{q_F}, \quad \text{при } \frac{|\sigma_1|}{f_{E0}} > sX \quad (21)$$

Контактное взаимодействие профиля СПА со стрежнем ровинга

Как было установлено ранее, первостепен-

ной причиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение профиля арматуры от основного стержня. Для моделирования данного процесса предлагается использовать модель связанной зоны – Cohesive zone model (CZM), в которой разрушения матрицы связующего рассматриваются как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с

последующим расслоением [12]. Разрушение поверхности контакта происходит постепенно вследствие деградации свойств склеивающей матрицы в контактном слое, что позволяет моделировать расслоение для прогнозирования допустимой величины сцепления СПА.

Работу материалов в области расслоения можно охарактеризовать с помощью нормальных или касательных напряжений и зазоров расслоения (в данном случае образование зазора происходит за счет тангенциального проскальзывания стержня относительно бетона) [12]. В результате чего допускается 3 вида разделения:

- 1 – смешанный вариант разделения по нормали и по касательной;
- 2 – сдвиг (смешанный вариант разделения по нормали и по касательной);
- 3 – отрыв (нарушение сцепления по нормали).

Процесс разделения двух связанных поверхностей арматуры (основного стержня и профиля арматуры) предлагается описывать склеенным контактом с использованием описания модели билинейного поведения материала.

В данной работе применяется модель соединения и разрушения контакта соединения 2-го вида, а именно сдвига. Расслоение вдоль контактной поверхности арматуры, а в данном случае «стержень-профиль», обладает существенным значением для несущей способности сцепления композитной арматуры с бетоном.

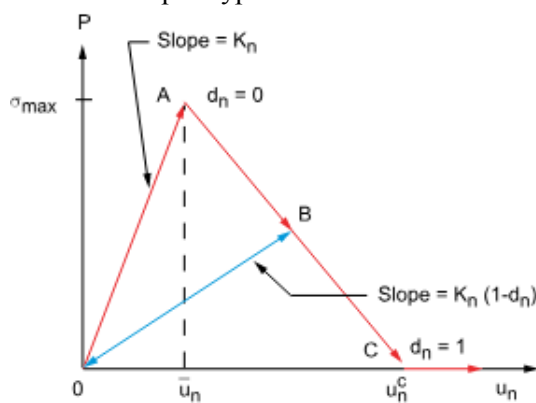


Рис. 4. Модель билинейного поведения материала в зоне контакта

На рисунке 4 показан график модели билинейного поведения профиля арматуры со стержнем [12].

$$\sigma_n = K_n u_n (1 - d_n) \quad (22)$$

где σ_n – напряжение; K_n – контактная жесткость; u_n – смещение по касательной в контактной области; d_n – параметр нарушения связывающей матрицы.

Параметр нарушения склеивающей матрицы:

$$d_n = \left(\frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n} \right) \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) \quad (23)$$

где $\bar{u}_n$ – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении; u_n^c – смещение в контактной зоне при разрушении склеивающей матрицы [12].

При $\Delta_n \leq 1$, при $\Delta_n > 1$, $0 < d_n \leq 1$, где $\Delta_n = \frac{u_n}{u_n^c}$.

При этом энергия критического разрушения вычисляется как:

$$G_{cn} = \frac{1}{2} \sigma_{max} u_n^c \quad (24)$$

где σ_{max} – максимальное контактное напряжение.

Для расчета требуются ориентировочные данные экспериментальных исследований, а именно должны быть заданы $\bar{u}_n$, u_n^c и K_n . Для их установления были использованы ранее полученные экспериментальные кривые зависимости «напряжение – смещение» [12]. Площадь под кривой представляет собой критическую энергию разрушения при разделении поверхностей профиля и стержня.

Анализ накопления повреждений в арматуре

Технология производства профиля СПА и металлической арматуры различна. СПА производится с помощью навивки ровинга, а металлическая арматура с помощью проката профиля. С точки зрения сцепления с бетоном – это особенно важно, потому что металлическая арматура имеет единую структуру и работает как единое изделие, перераспределяя напряжения по всему стержню. В тоже время профиль и стержень СПА работают как два различных материала, в которых распределение напряжений происходит через склеивающую матрицу. Это означает, что применять один критерий понятия дефекта (повреждения) для СПА и металлической арматуры будет некорректно. Само понятие повреждения имеет диапазон значений от 0 до 1, в котором под 1 подразумевается полное разрушение материала.

Как было упомянуто ранее, такой подход для СПА недопустим, так как она является композиционным материалом (с ортотропными свойствами), в состав которого входит стекловолоконная фибра и органическое вяжущее. Поэтому для корректного исследования понятия дефекта необходимо рассматривать отдельно такие факторы как:

- разрушение волокна растяжением;
- разрушение волокна сжатием;
- разрушение матрицы СПА растяжением;
- разрушение матрицы СПА сжатием;

Для удовлетворения этих факторов применялся критерий разрушения материала А.Руска.

Как было установлено, первостепенной при-

чиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение профиля арматуры от основного стержня. Для решения данной задачи применяется модель CZM, описывающая этот процесс (см. пункт выше).

Однако, кроме среза профиля СПА происходит накопление дефектов в арматуре. Как показано на рис. 5, максимальное накопление повреждений с учетом всех принятых нами факторов наблюдается на витках СПА в области анкеровки и равняется 1,579.

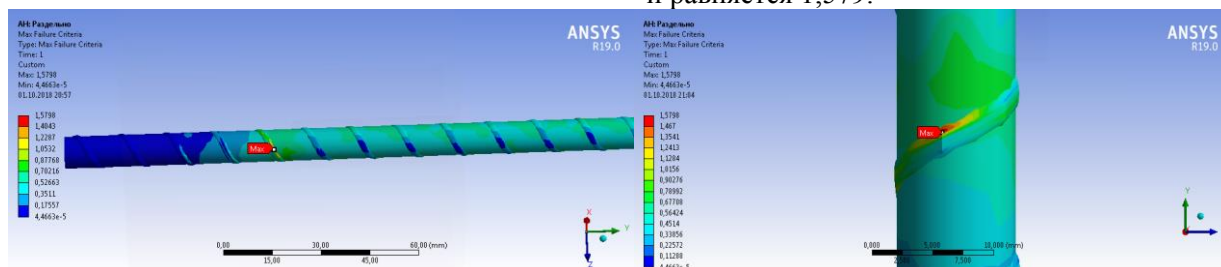


Рис. 5. Максимальные повреждения СПА

При отдельном рассмотрении критериев повреждений из рисунка 6б видно, что эти повреждения образуются вследствие растягивающих усилий в волокне, которые примерно в 1,5 раза выше максимально допустимой величины. Следует отметить, что в основном стержне эта величина составляет 0,35, что указывает на то, что арматура не выработала свой резерв.

В то же время, из-за действия сжимающих

усилий волокна в витках СПА так же разрушаются, хотя величина повреждений ниже. Однако, в основном стержне величина повреждений от сжимающих усилий выше, чем от растягивающих, и составляет 0,47 от них.

Данные разрушения в СПА подтверждаются испытанием на вырыв арматуры из бетона В15. Разрушение профиля СПА происходит по верхним слоям витка, а в основном стержне повреждений не наблюдается.

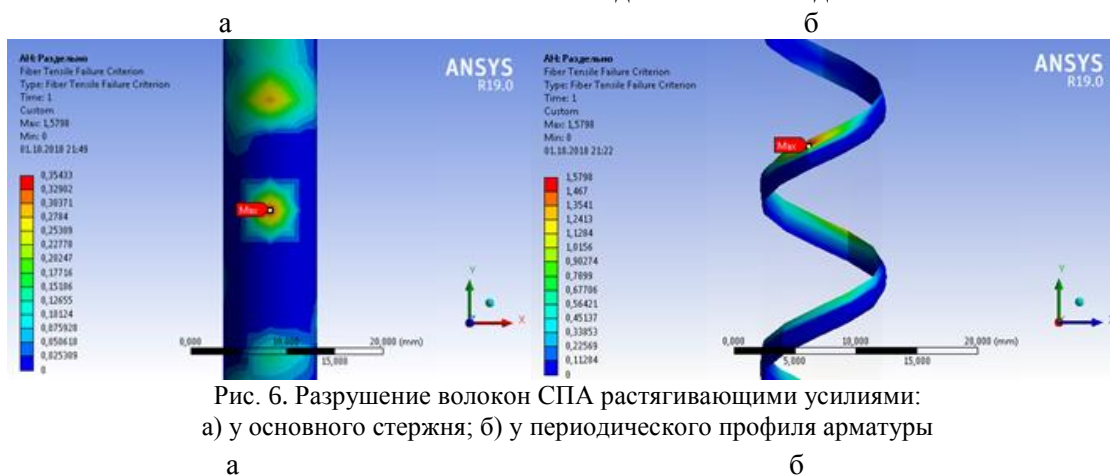


Рис. 6. Разрушение волокон СПА растягивающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

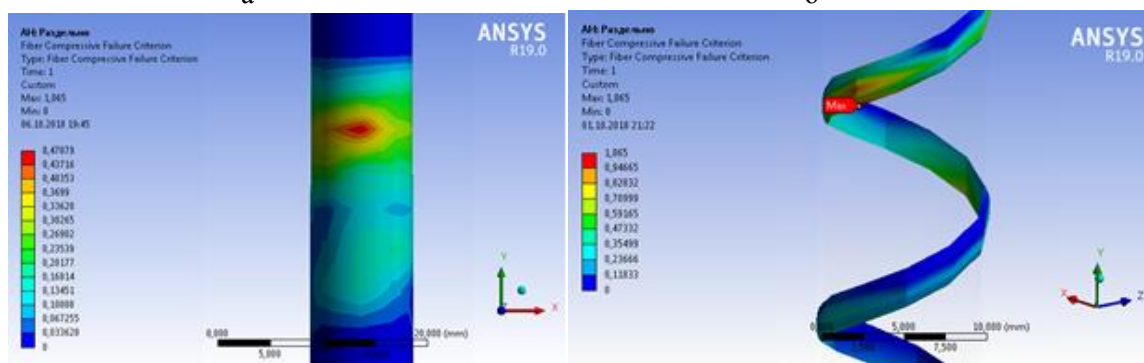


Рис. 7. Разрушение волокон СПА сжимающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что воздействие растягивающих и сжимающих усилий волокна профиля СПА в основном

стержне оказывает малое влияние на работу арматуры с бетоном. Однако, разрушение волокон профиля ведет к снижению величины сцепления (рис. 7).

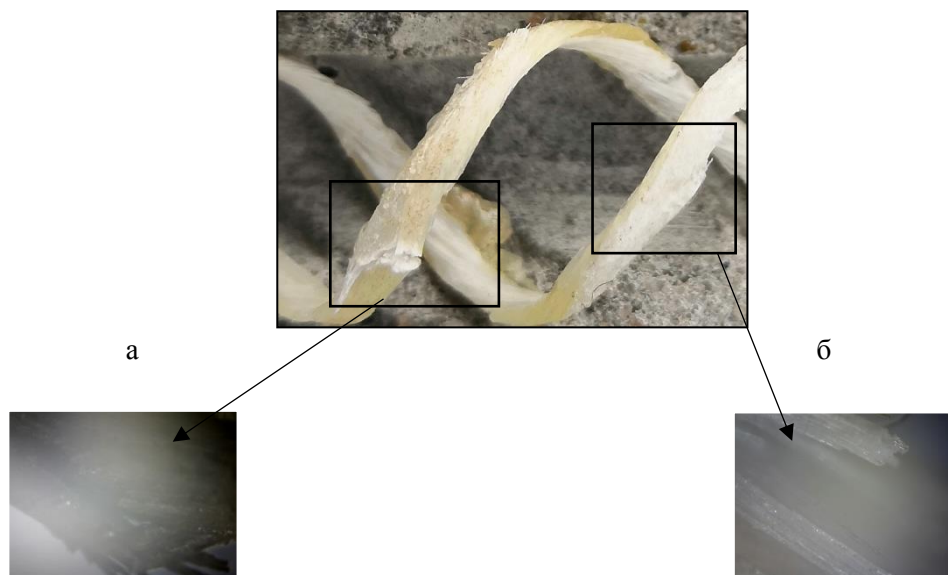


Рис. 8. Разрушение волокон в периодическом профиле СПА
а) разрушения от растягивающих усилий; б) разрушения от сжимающих усилий

Исходя из общих принципов, можно легко установить следующее: линейные дефекты в структуре волокон с параллельной структурой и одной плоскостью скольжения не накладываются друг на друга. Это можно наблюдать в витках профиля, когда разрушение внешних волокон не ведет к последующему разрушению композита, такому как при линейном расположении структуры в витках с параллельным расположением волокон. Волокна, относящиеся к общей плоскости скольжения, находятся на таком расстоянии, что зоны вызываемых разрушений не перекрываются; взаимного влияния на разрушения практически не оказывается. Менее очевидно установление характера взаимодействий между линейными дислокациями одного знака, но относящихся к различным плоскостям скольжения, хотя принцип остается тем же самым.

Наглядность разрушения матрицы можно считать подтверждением адекватности построенной модели, потому что характер образования разрушений в численной модели СПА такой же,

как у экспериментальных образцов. Так, максимальные разрушения матрицы происходят во внешних волокнах и к середине образца затухают.

Наблюдается, что разрушения матрицы в основном стержне в области анкерки составляют 0,76 от растягивающих усилий, что объясняет редкие случаи в выборке испытаний, когда арматура разрушалась по стержню без окончания испытания на вырыв. Следует отметить, что такое же разрушение замечалось при испытаниях с заделкой анкера $l/d \geq 6$, так как величина разрушения матрицы возрастала.

Разрушение матрицы представляет собой отслоение волокон композита вдоль сопрягающих слоев, что оказывает значимую роль в ограничении прочности и податливости как «матрично-матричных» композитов, так и слоистых композитных структур. Это является основной причиной разрушения СПА. В качестве примера обратного эффекта можно привести разрушение матрицы витков профиля, которое достигает 0,297 (рис. 9а).

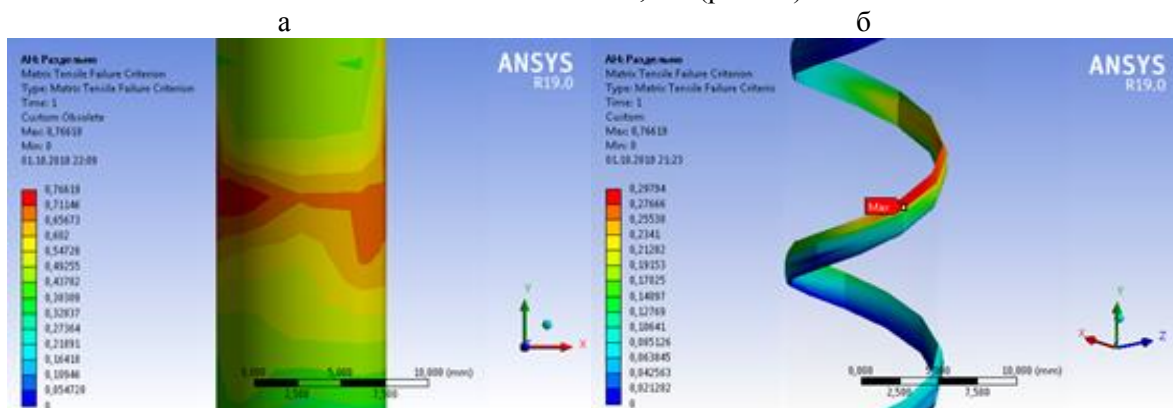


Рис. 9. Разрушение матрицы СПА растягивающими усилиями:
а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

При рассмотрении разрушения матрицы сжимающими усилиями, в стержне и в профиле повреждения минимальны, а величины принимают значения ниже 0,1. У СПА в зоне контакта

сжимающие усилия минимальны, и слоистая структура хорошо их воспринимает.

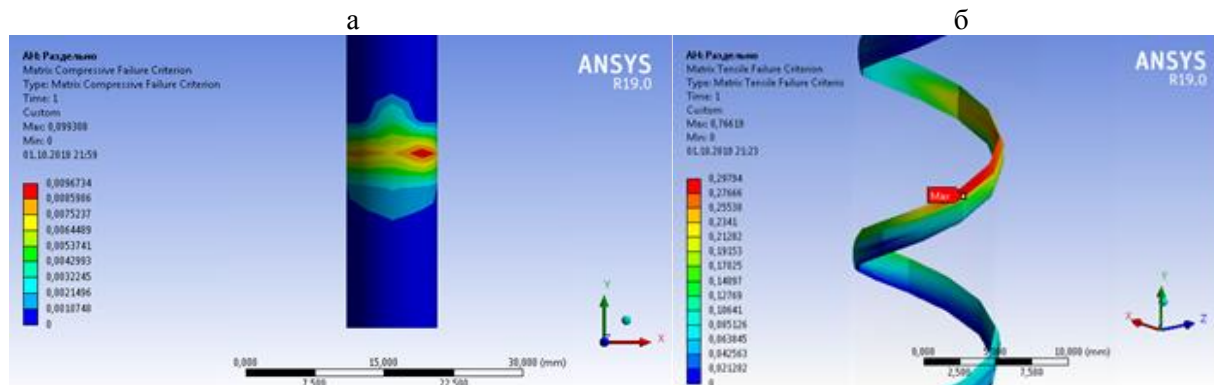


Рис. 10. Разрушения матрицы СПА сжимающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

Однако, следует отметить, что если скольжение одного волокна матрицы по-другому продолжается по вновь возникающим дислокациям и ничем не затормаживается, то без дальнейшего увеличения нагрузки начинается смещение волокон внутри матрицы, которое преобразуется в сдвиговые усилия между пучками волокон относительно друг друга, приводящие к значительному общему относительному удлинению структуры СПА и последующему разрушению. Однако, проскальзывания одного волокна по-другому может и не произойти, что приведет к упрочнению матрицы, которая выступает в роли тормозящей или предотвращающей перемещение.

Другой причиной скольжения по тем плоскостям, по которым происходит разрушение матрицы, является изменение ориентации плоскостей направления скольжения вследствие их поворота (угол, составляемый ими с осью СПА образца, уменьшается при его растяжении). Следует, конечно, иметь ввиду, что вследствие возникновения дефектов с одной стороны и поворота пачек волокон относительно другой создаются условия для повышения составляющих касательных напряжений по всем плоскостям, что может привести к скольжению и по другим, новым плоскостям волокон.

В случае винтовых скольжений разрушение должно происходить в перпендикулярном или параллельном оси скольжения направлениях. Поэтому одной из причин, препятствующих разрушению матрицы СПА, является пересечение волокон в различных плоскостях в том случае, если они не компланарны, так как не существует параллельного или перпендикулярного направления всем трем некомпланарным волокнам.

Все процессы, приводящие к уменьшению

потенциала энергии внутри матрицы (что равносильно уменьшению ее искаженности), делают состояние матрицы более устойчивым. Вопреки этому, расшатанности матрицы повышают ее потенциальную энергию.

Выводы. Анализ результатов численных исследований позволил установить, что наибольшую степень влияния на прочность СПА при решении задачи сцепления оказывают такие параметры, как ориентация и прочность волокна СПА по направлению перерезывающих усилий (или сменяющих усилий на бетонных консолях), габаритные размеры стержня и податливость бетонного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. 184с.
2. Хозин В.Г. [и др.] Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. № 1 (23). С. 214–220.
3. Овчинникова И.Г. Напряженно деформированное состояние бетона в области силового воздействия с арматурой. В. кн.: Сцепление арматурой с бетоном. Челябинск. ЦНТО Стройиндустрия, МИСИ, ЧПИ, НИИЖБ, ВНИИ Железобетон, 1971.
4. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости Общие технические условия. НИИБЖ им. А. А. Гвоздева. М., 2014. 56 с.
5. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. НИИБЖ им. А.А. Гвоздева. М., 2013. 42 с.
6. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости

и коэффициента Пуассона. Министерством металлургии СССР. М., 1983. 36 с.

7. ANSYS Mechanical APDL theory reference // Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013. 952 p.

8. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. P. 157–165.

9. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1994. Infoscience. Web.

10. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete // Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. No. 19. Pp. 1–30.

11. Puck A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Carl Hanser. 1996.

12. Кашеварова Г.Г., Мартирисян А.С., Травуш В.И. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. С. 62–75.

Информация об авторах

Николюкин Алексей Николаевич, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: valax1@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д.112.

Ярцев Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д.112.

Коломникова Ирина Игоревна, бакалавр. E-mail: kolomnikova_ii@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Поступила в марте 2019 г.

© Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И., 2019

^{1,*}Nikolyukin A.N., ¹Yartsev V.P., ¹Kolomnikova I.I.

¹Tambov State Technical University
Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112
E-mail: valax1@yandex.ru.

NUMERICAL MODELING OF COMPOSITE FITTINGS FOR CLUTCHING WITH CONCRETE

Abstract. Reinforced concrete is one of the most common materials in construction. Constructions made of this material have a high bearing capacity; well perceived dynamic and static loads. This is ensured by the adhesion between the reinforcing bar and concrete. The amount of adhesion is made from a number of different factors formed in the region of the conventional surface of interaction of reinforcement with concrete. It is implied that even if any reinforcement is used, materials come into contact over the surface, which can collapse depending on the load. Violation of the clutch causes significant deformation of the structure, which subsequently leads to a loss of the bearing capacity of the element. Therefore, there is a need to study the magnitude of the adhesion between concrete and reinforcement under various influences. This article describes the results of a numerical experiment on pulling out fiberglass reinforcement of a periodic profile from concrete. A mathematical model is constructed, which allows to study the accumulation of defects and the destruction of reinforcement in the area of concrete fixing. The results of numerical studies are considered.

Keywords: concrete, fiberglass reinforcement, adhesion, digging, mathematical model, destruction.

REFERENCES

1. Holmyanskij M.M. Contact reinforcement with concrete [Kontakt armatury s betonom]. M.: Strojizdat. 1981, 184 p. (rus)
2. Hozin V.G. and other. Coupling polymer composite reinforcement with cement concrete

[Sceplenie polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom]. Izvestiya KGASU. 2013. No. 1 (23). Pp. 214–220. (rus)

3. Ovchinnikova I.G. Stress-strain state of concrete in the field of force action with reinforcement [Napryazhenno deformirovannoe sostoyanie betona v oblasti silovogo vozdejstviya s armaturoj]. V. kn.: Sceplenie armaturoj s betonom. Chelyabinsk.

CPNTO Strojindustriya, MISI, CHPI, NIIZH, VNII Zhelezobeton. (rus)

4. GOST 10060-2012. Concretes. Methods for determining the frost resistance General technical conditions [Betony. Metody opredeleniya morozostoystkosti Obshchie tekhnicheskie usloviya]. NIIBZH im. A. A. Gvozdeva. M. 2014. 56 p. (rus)

5. GOST 31938-2012. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. General technical conditions [Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya]. NIIBZH im. A. A. Gvozdeva. M. 2013. 42 p. (rus)

6. GOST 24452-80. Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio [Betony. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koefficienta Puassona]. USSR Ministry of Metallurgy. M., 1983. 36 p. (rus)

7. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA. 2013. 952 p.

8. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. P. 157-165.

9. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. Lausanne. 1994. Infoscience. Web.

10. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete. Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. No. 19. Pp. 1-30.

11. Puck A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Carl Hanser. 1996.

12. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Computational and experimental study of the process of destruction of bonds of adhesion when pressing a rod of rigid reinforcement into concrete [Raschetno-eksperimental'noe issledovanie processa razrusheniya svyazej scepneniya pri vdavlivanii sterzhnya zhestkoj armatury v beton]. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2016. No. 3. Pp. 62-75. (rus)

Information about the author

Nikolyukin, Alexey N. Postgraduate student. E-mail: valax1@yandex.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Yartsev, Viktor P. DSc, Professor. E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Kolomnikova, Irina I. Bachelor student. E-mail: kolomnikova_ii@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

Received in March 2019

Для цитирования:

Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И. Численное моделирование композитной арматуры для задачи сцепления с бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 56-65. DOI: 10.34031/article_5ce292ca089623.21062637

For citation:

Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Kolomnikova I.I. Numerical modeling of composite fittings for clutching with concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 56-65. DOI: 10.34031/article_5ce292ca089623.21062637

DOI: 10.34031/article_5cd6df46bad533.65326025

^{1,*}Аль-Хаваф А. Ф.-К., ¹Никулин А.И.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

*E-mail: alifadhel087@gmail.com

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ИЗ БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ БЕТОННОГО ЩЕБНЯ

Аннотация. В данной статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований центрально сжатых железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня. Предыдущие исследования продемонстрировали, что переработанный бетон в виде измельченного бетонного щебня, полученный из строительных отходов, может быть приемлемой и экологически чистой альтернативой традиционному крупному заполнителю для изготовления несущих конструкций. В настоящее время в научной литературе имеется ограниченный объем информации о методиках расчета, которые должны использоваться для проектирования железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня. С целью обоснования исходных предпосылок, гипотез и возможных ограничений при разработке методик расчета центрально и внецентренно сжатых элементов из указанного бетона в данной работе выполнено обобщение имеющихся в зарубежной и отечественной литературе экспериментальных данных о физико-механических свойствах такого бетона, а также об особенностях деформирования, изготовленных из него железобетонных колонн. Были проанализированы исследования, связанные с изучением влияния различного содержания в бетоне переработанного бетонного заполнителя, количества продольной стальной арматуры в сечении элемента и предела её текучести, шага и предела текучести поперечной арматуры на деформативность и несущую способность колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня. Показано, что использование такого бетона для изготовления центрально и внецентренно сжатых железобетонных колонн приводит к незначительному снижению их несущей способности. Это указывает на возможность утилизации значительного объема бетонного щебня, получаемого в результате переработки разрушенных при сносе зданий железобетонных конструкций, что позволяет отнести такую технологию к «зеленому строительству».

Ключевые слова: железобетон, колонна, конструкционный бетон, крупный заполнитель, бетонный щебень, несущая способность колонны, центральное сжатие, экспериментальные исследования, обобщение результатов.

Введение. Использование отходов строительства и утилизации железобетонных конструкций в качестве крупного заполнителя в новой бетонной смеси было признано привлекательным подходом к сохранению природных ресурсов и снижению воздействия строительной отрасли на окружающую среду [1–4]. В настоящее время в литературе имеется очень ограниченная информация о методах, которые будут использоваться для проектирования железобетонных элементов, изготовленных из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя.

При этом проведенные ранее многочисленные исследования продемонстрировали, что переработанный бетон в виде щебня может быть приемлемой и экологически чистой альтернативой традиционному природному заполнителю для изготовления несущих железобетонных конструкций. Получаемую при этом бетонную смесь можно отнести к материалам для «зеленого строительства». Однако бетон с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя характеризу-

ется, как правило, несколько пониженными механическими и прочностными свойствами по сравнению с традиционными бетонами с природным заполнителем [5–12].

Железобетонные конструкции, изготовленные с добавлением бетонного щебня, будут способствовать повторному использованию отходов бетона и могут быть использованы в строительстве в широких масштабах аналогично обычным железобетонным конструкциям из природного заполнителя.

Основная часть. Железобетонные балки и колонны являются основными несущими конструкциями каркасов зданий, и поэтому особенности их нелинейного деформирования при различных видах нагружений должны быть учтены при проектировании с максимально возможной точностью. С целью выявления и обобщения особенностей нелинейного деформирования железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя был выполнен анализ результатов экспериментов, проведенных

различными исследователями [13–16]. Все авторы указанных публикаций пришли к выводу, что силовое сопротивление испытанных образцов рассматриваемого типа на всех этапах их нагружения аналогично железобетонным колоннам из традиционного бетона. Однако увеличение содержания в образцах заполнителя из бетонного боя более 30 % приводит к некоторому уменьшению их несущей способности.

Кроме того, экспериментальный разброс результатов определения несущей способности таких колонн был исследован в работе [17], в которой был показан существенный рост коэффициента вариации для рассматриваемого параметра их несущей способности при сжатии, что требует внесения изменений в процедуру проектирования в виде корректировки частных коэффициентов безопасности по материалу применительно к бетонам с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня.

В представленном ниже обзоре научных публикаций показано, что исследование сопротивления центрально сжатых железобетонных

колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя имеет пока ограниченный характер. Недостаточно внимания уделялось также совершенствованию расчетных методик, которые должны использоваться для проектирования железобетонных элементов рассматриваемого вида. Поэтому изучение особенностей сопротивления сжатию железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя имеет важнейшее значение для начала широкомасштабного изготовления несущих конструкций зданий и сооружений из этого материала.

Некоторые экспериментальные результаты из литературы [13, 15, 16] для квадратных и круглых железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя, а также свойства материалов и геометрические характеристики испытанных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований внецентренно сжатых железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя

Образец	w_{eff}/c	r , %	f_c , МПа	E_c , ГПа	L_e , мм	$h=b$; (D_e) , мм	d_s , мм	$f_{y,b}$, МПа	E_s , ГПа	d_{hoop} , мм	S , мм	$f_{y,v}$, МПа	$P_{u,t}$, кН
CRC0	0.436	0	39.05	24.2	1000	400	19	405.6	153.43	10	200	402.0	6136
CRC30	0.436	30	33.81	22.1	1000	400	19	405.6	153.43	10	200	402.0	6253
CRC60	0.436	60	32.35	20.5	1000	400	19	405.6	153.43	10	200	402.0	5814
CRC100	0.436	100	29.17	20.8	1000	400	19	405.6	153.43	10	200	402.0	5579
HCRC0	0.333	0	36.78	23.8	1000	400	19	427.8	157.55	10	200	483.2	6845
HCRC30	0.333	30	34.86	21.5	1000	400	19	427.8	157.55	10	200	483.2	6607
HCRC60	0.333	60	37.69	23.2	1000	400	19	427.8	157.55	10	200	483.2	6886
HCRC100	0.333	100	36.60	21.1	1000	400	19	427.8	157.55	10	200	483.2	5809
CRC0F0	0.414	0	27.18	24.7	1000	400	19	451.0	178.72	10	200	556.0	5849
CRC15F60	0.414	15	31.95	23.8	1000	400	19	451.0	178.72	10	200	556.0	6510
CRC30F45	0.407	30	31.28	24.9	1000	400	19	451.0	178.72	10	200	556.0	6657
CRC45F30	0.407	45	30.79	23.4	1000	400	19	451.0	178.72	10	200	556.0	5983
CRC60F15	0.407	60	31.61	23.8	1000	400	19	451.0	178.72	10	200	556.0	6472
rrac-30-1	0.45	0	36.24	27.0	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	997
rrac-30-2	0.45	0	36.24	27.0	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1021
rrac-30-3	0.45	0	36.24	27.0	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1037
rrac-30-0.5-1	0.45	50	37.36	23.9	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1011
rrac-30-0.5-2	0.45	50	37.36	23.9	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	943
rrac-30-0.5-3	0.45	50	37.36	23.9	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	963
rrac-30-1-1	0.45	100	34.48	21.2	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	946
rrac-30-1-2	0.45	100	34.48	21.2	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	959
rrac-30-1-3	0.45	100	34.48	21.2	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	984
rrac-50-1-1	0.31	100	57.60	26.5	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1383
rrac-50-1-2	0.31	100	57.60	26.5	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1357
rrac-50-1-3	0.31	100	57.60	26.5	450	150	12	380.0	–	8	50	315.0	1296

В табл. 1 используются следующие обозначения: $w_{eff/c}$ – относительный эксцентриситет приложения продольной силы; r – содержание крупного заполнителя из бетонного боя, %; f_c – прочность при сжатии бетонных цилиндров; E_c – модуль упругости бетона; L_e – длина колонны; b , h – ширина квадратного сечения колонны; D_e – внешний диаметр поперечного сечения колонны; d_s – диаметр продольной арматуры; $f_{y,b}$ – предел текучести поперечной арматуры; d_{hoop} – диаметр поперечной арматуры; E_s – модуль упругости

продольной арматуры; S – шаг поперечной арматуры; $f_{y,v}$ – предел текучести продольной стальной арматуры; $P_{u,t}$ – экспериментальная предельная осевая нагрузка.

На рисунке 1 представлены экспериментальные графики, показывающие особенности сопротивления железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя [13, 15, 16] в зависимости от действия возрастающей продольной осевой нагрузки.

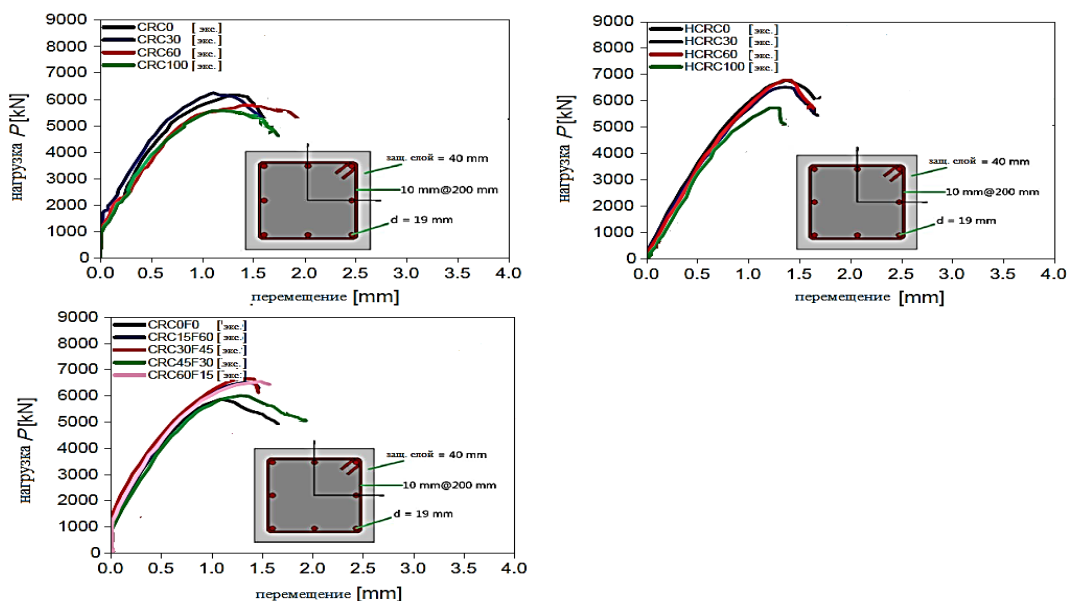


Рис. 1. Графики зависимости перемещений от продольной осевой нагрузки для железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя

Поскольку пока отсутствуют конкретные методики расчета для определения несущей способности (P_u) железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного боя, выполняем апробацию экспериментальных результатов с расчетными данными, полученными по существующим алгоритмам, предназначенным для традиционных бетонов.

Рассматривались расчетные выражения из норм разных стран, представленные в табл. 2.

Следует отметить, что все расчетные формулы (см. табл. 2) имеют аналогичный вид и отличаются только понижающим коэффициентом, который добавляется к решению, полученному по методу предельного равновесия.

Графическая интерпретация результатов сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных, выполненных по расчетным формулам для определения несущей способности сжатых колонн, представлена на рис. 2.

Таблица 2

Расчетные формулы для определения несущей способности железобетонных колонн

Нормы проектирования	Расчетная формула	Среднее значение отношения расчетной и экспериментальной величин ($P_{u,calc} / P_{u,exp}$)	Коэффициент вариации
GB 50010-2010 [20]	$P_u = 0.9(f_c A_c + f_{y,b} A_s)$	0.81	0.10
ACI 318 [21]	$P_u = 0.85 f_c A_c + f_{y,b} A_s$	0.84	0.07
Еврокод 2 [22]	$P_u = 0.8 f_c A_c + f_{y,b} A_s$	0.80	0.07
NZS 3101 [23]	$P_u = 0.85(f_c A_c + f_{y,b} A_s)$	0.81	0.08
Принцип предельного равновесия	$P_u = f_c A_c + f_{y,b} A_s$	0.90	0.10

Из рис. 2 и табл. 2 видно, что нормы проектирования различных стран, а также уравнение, полученное на основе метода предельного равновесия, дают результаты, приемлемые для определения несущей способности железобетонных колонн из переработанного крупного заполнителя. Однако расчетные данные существенно недооценивают опытные результаты.

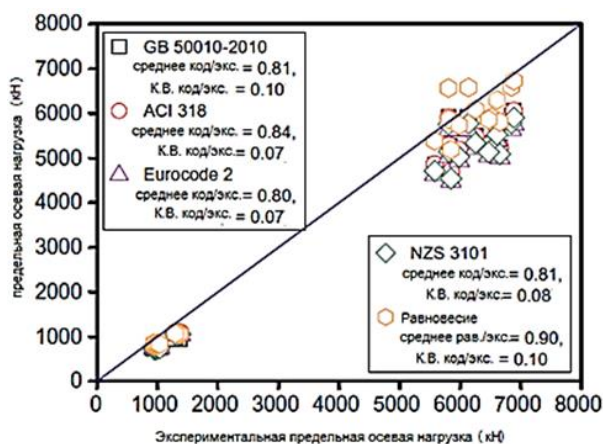


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, выполненных по расчетным формулам для определения несущей способности сжатых колонн [15, 16]

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что нормативные документы GB

50010-2010, ACI 318, Еврокод 2, NZS 3101 и уравнение предельного равновесия дают, соответственно, 19 %, 16 %, 20 %, 19 % и 10 % недооценки по сравнению с экспериментальными результатами.

В нормативных документах разных стран (табл. 3) уже предусматривается возможность полной или частичной замены природного крупного заполнителя (а иногда и мелкого) на его аналог из бетонного щебня при изготовлении несущих железобетонных конструкций.

Значительное количество исследований [7–12, 24–25] показало, что деформативно-прочностные характеристики бетонов с добавлением бетонного щебня и соответствующих несущих элементов (например, железобетонных колонн) связаны не только с содержанием в их составе бетонного щебня, но на них также влияет качество переработанных бетонных заполнителей, что определяется их водопоглощением и плотностью.

Исследования [26, 27] показали, что заполнитель из переработанного бетонного боя обладает более высоким водопоглощением по сравнению с природным аналогом, содержит прилипший цементный раствор и имеет микротрещины, образующиеся при дроблении перерабатываемых бетонных элементов.

Таблица 3

Бетоны с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня в международных стандартах

Страна	Нормативный документ	Ограничения применения	Содержание крупного заполнителя из бетонного боя, %	Содержание мелкого заполнителя из бетонного боя, %	$f_{c,max}$ (замена до 100 %)	$f_{c,max}$ (замена до 20 %)
Бразилия	Draft NBR	–	0–100	0–20	–	45 н/мм ²
Германия	DIN 4226-100	нет предстрессового	0–45	не допускается	37 н/мм ²	
Голландия	NEN 5950	–	0–100	0–20	45 н/мм ²	без ограничений
Италия	DM 14/01/2008	–	0–100	не допускается	10 н/мм ²	37 н/мм ²
Япония	JIS A 5021/3	Конкретное использование	0–100	–	37 н/мм ²	–
Испания	Draft ENE	–	0–20	–	45 н/мм ²	
Великобритания	BS 6543 BRE 433	–	0–20	не рекомендуется	60 н/мм ²	Без ограничений
США	ACI 555R-01	–	0–100	0–100	при ACI 318	

В работе [19] представлены результаты исследований влияния на несущую способность колонн коэффициента продольного армирования сечения (ρ_s), а также различного содержания (r) в бетоне крупного заполнителя из бетонного

щебня. Соответствующие графики показаны на рисунках 3 и 4. Можно отметить, что коэффициент продольного армирования сечения (ρ_s) оказы-

вает значительное влияние на несущую способность колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня.

В этом же исследовании [19] установлено влияние предела текучести поперечной стальной

арматуры ($f_{y,b}$) на деформативность и несущую способность рассматриваемых колонн (рисунки 5 и 6).

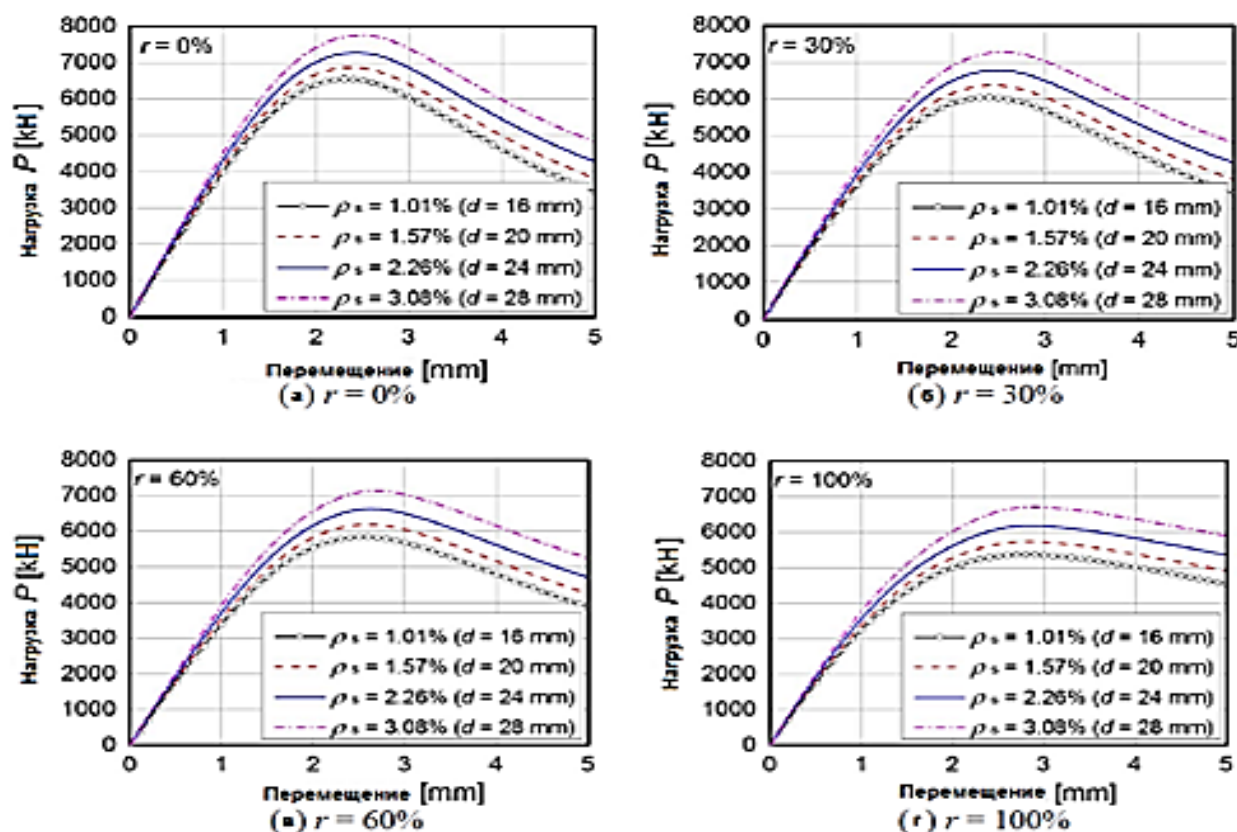


Рис. 3. Влияние на деформативность и несущую способность колонн коэффициента продольного армирования сечения (ρ_s), а также различного содержания (r) в бетоне крупного заполнителя из бетонного щебня (шаг поперечной арматуры – 200 мм) [19]

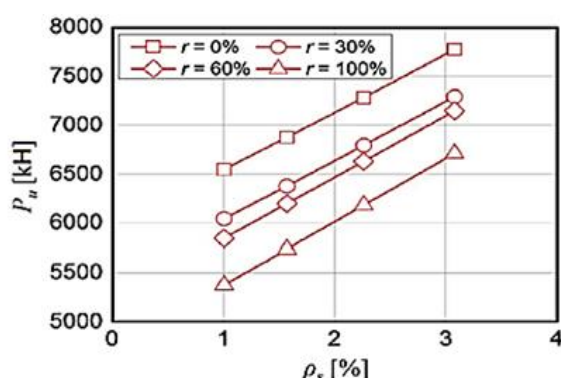


Рис. 4. Влияние коэффициента продольного армирования сечения (ρ_s) на предельную несущую способность колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня P_u [19]

Рис. 5 и 6 иллюстрируют, что увеличение предела текучести поперечной арматуры $f_{y,b}$ приводит к незначительному повышению несущей способности колонн. Однако при одинаковых

значениях коэффициента продольного армирования сечения ρ_s и предела текучести поперечной арматуры $f_{y,b}$ увеличение содержания переработанного бетонного заполнителя (r) способствует снижению несущей способности железобетонных колонн. Это объясняется более высокой деформативностью (сжимаемостью) бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня.

Изменение шага поперечной арматуры (S) в колоннах приводит к соответствующему снижению или увеличению коэффициента поперечных деформаций, что может заметно повлиять на деформативность и несущую способность железобетонных колонн из различных бетонов (рисунки 7 и 8), в том числе с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня [27].

Можно отметить, что увеличение параметра S приводит к снижению несущей способности железобетонных колонн. Это связано с тем, что

увеличение расстояния между стержнями поперечной стальной арматуры при сохранении других параметров постоянными приводит к увеличению коэффициента поперечных деформаций,

что, в свою очередь, понижает несущую способность железобетонных колонн из такого типа бетона.

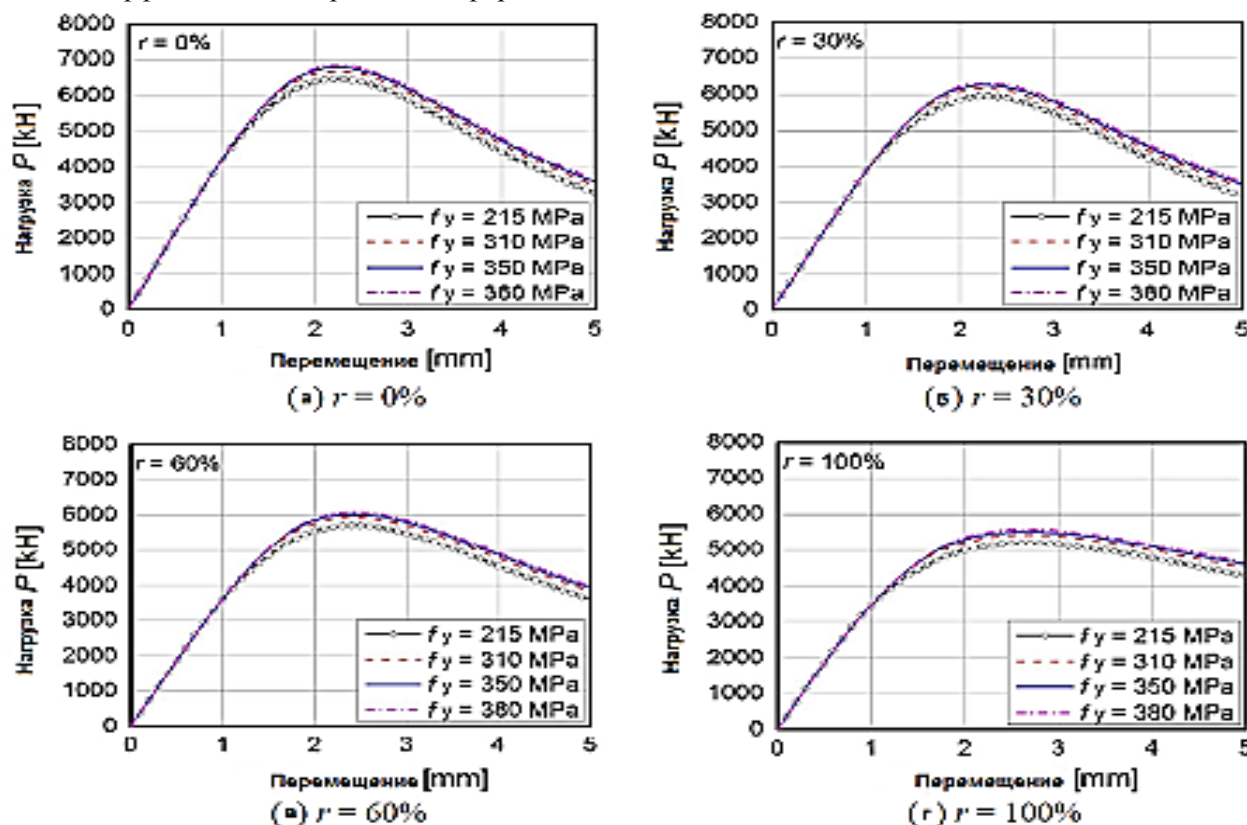


Рис. 5. Влияние предела текучести поперечной арматуры на деформативность и несущую способность железобетонных колонн (шаг поперечной арматуры 200 мм) [19]

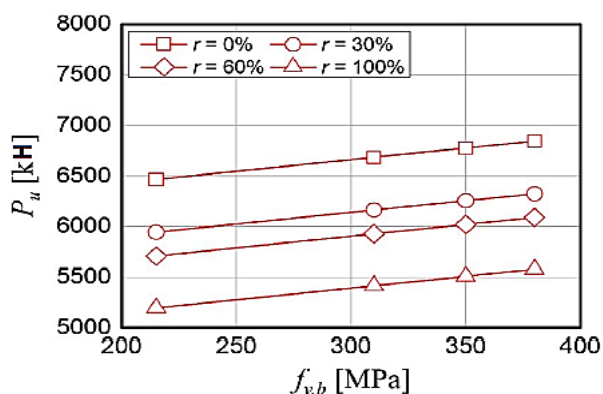


Рис. 6. Влияние предела текучести поперечной арматуры на несущую способность железобетонных колонн [19]

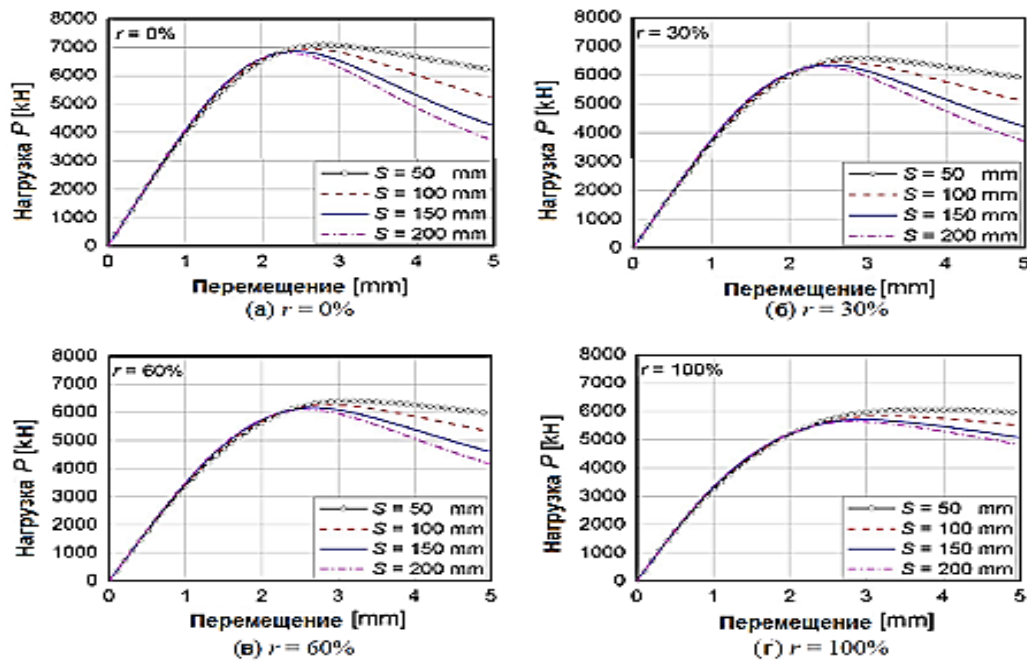
На рис. 9 и 10 показано влияние предела текучести продольной арматуры $f_{y,v}$ на деформативность и несущую способность железобетонных колонн из бетонов с различным содержанием крупного заполнителя из бетонного щебня при неизменном шаге поперечной арматуры ($S = 200$ мм). Из графиков, представленных на рис. 9, можно также видеть, что нисходящие

ветви зависимостей «продольная сила – перемещение» имеют незначительное расхождение, зависящее от пределов текучести продольной арматуры $f_{y,v}$. На основании анализа рисунка 10 можно сделать вывод о незначительном влиянии параметра $f_{y,v}$ на несущую способность железобетонных колонн.

Выводы

1. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время имеется достаточно ограниченный объем информации о методиках, которые должны использоваться для расчета и проектирования железобетонных конструкций, изготовленных из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня.

2. Результаты этого исследования позволяют установить, что использование бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня в железобетонных колоннах оказывает незначительное влияние на особенности их сопротивления при центральной сжатии. Это открывает широкие возможности для применения таких бетонов в строительной практике, развивая тем самым перспективные технологии «зеленого строительства».



3.
Рис. 7. Влияние шага поперечной арматуры на деформативность и несущую способность колонн [27]

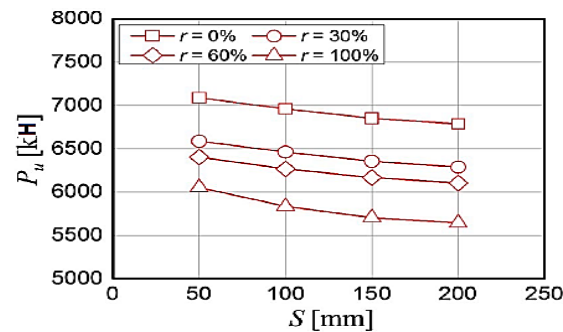


Рис. 8. Влияние шага поперечной арматуры на несущую способность железобетонных колонн [27]

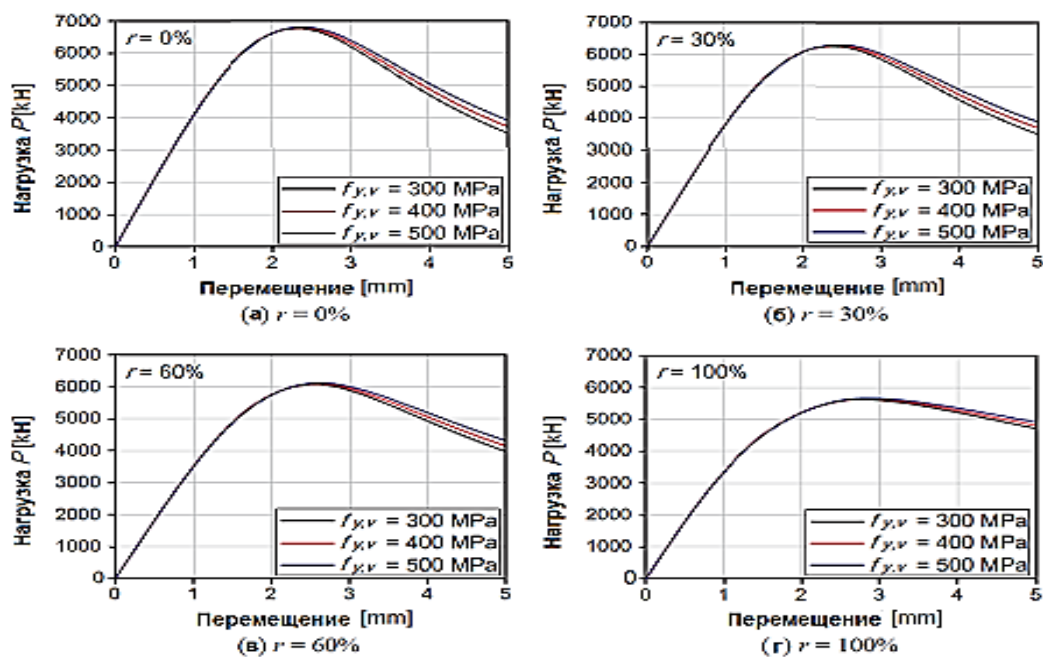


Рис. 9. Влияние предела текучести продольной арматуры на деформативность и несущую способность железобетонных колонн (шаг поперечной арматуры 200 мм) [27]

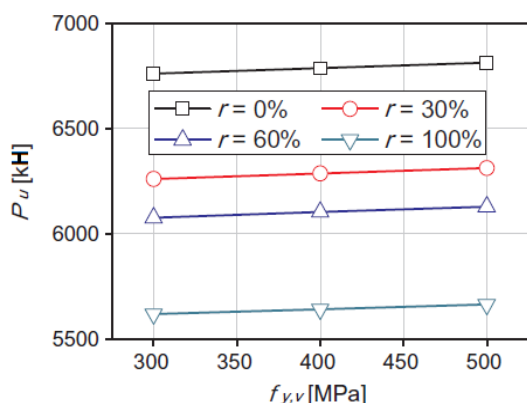


Рис. 10. Влияние предела текучести продольной арматуры на несущую способность центрально сжатых железобетонных колонн [27]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Муртазаев С.-А.Ю. Эффективные бетоны и растворы для строительных и восстановительных работ с использованием бетонного лома и отвалных зол ТЭС // Вестник МГСУ. 2008. № 3. С. 124–128.
2. Болтрик М., Малашкевич Д., Паулючук Е. Основные технические свойства вторичного бетонного заполнителя. Польша: Технический университет Белостока, 2007.
3. Муртазаев С.-А.Ю. Эффективные бетоны и растворы на основе техногенного сырья для ремонтно-строительных работ: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 43 с.
4. Муртазаев С.-А.Ю., Исмаилова З.Х. Использование местных техногенных отходов в мелкозернистых бетонах // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 57–58.
5. Chen Z.P., Xu J.J., Xue J.Y., Su Y.S. Performance and calculations of recycle aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression // Int J Steel Struct. 2014. Vol. 14(1). Pp. 31–42.
6. Islam M.J., Meherier M.S., Islam A.K.M. R. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete // Construction and Building Materials. 125 (Supplement C). 2016. Pp. 946–951.
7. Safiullah O., Elhem G., George W. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 108. Pp. 163–174.
8. Dos Santos J.R., Branco F., De Brito J. Mechanical properties of concrete with coarse recycled aggregates // Struct Eng Int. 2004. Vol. 3. Pp. 213–5.
9. Tabsh S.W., Abdelfatah A.S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete // Constr Build Mater. 2009. Vol. 23(1). Pp. 163–167.
10. Dodds W., Goodier C., Christodoulou C., Austin S., Dunne D. Durability performance of sustainable structural concrete: effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress // Constr Build Mater. 2017. Vol. 145. Pp. 183–195.
11. Cabral A.E.B., Schalch V., Molin D.C.C.D., Ribeiro J.L.D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24 (4). Pp. 421–430.
12. Pacheco J., de Brito J., Ferreira J., Soares D. Flexural load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. Part 1. Pp. 65–71.
13. Silva R.V., Brito J., Evangelista L., Dhir R.K. Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2 // Constr. Build. Mater. 2016. Vol. 105. Pp. 144–156.
14. Tošić N., Marinković S., Ignjatović I.A. Database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions // Constr Build Mater. 2016. Vol. 127. Pp. 932–944.
15. Wang Y.Y., Chen J., Zong B., Geng Y. Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs // J Build Struct. 2011. Vol. 32(12). Pp. 170–177.
16. Choi W.C., Yun H.D. Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading // Eng Struct. 2012. Vol. 41(3). Pp. 285–293.
17. Breccolotti M., Materazzi A.L. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete // Eng Struct. 2010. Vol. 32(11). Pp. 3704–3712.
18. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // ASCE J Struct Eng. 1998. Vol. 114(8). Pp. 1804–26.
19. Xiao J.Z., Li J.B., Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading // Cem Concr Res. 2005. Vol. 35(6). Pp. 1187–1194.
20. Chinese Standard. GB 50010-2010. Code for design of concrete structures. Beijing: China Planning Press; 2010.
21. ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2011.
22. EN 1992-1-1. Eurocode 2: design of concrete structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN; 2004.
23. New Zealand Standard. NZS 3101: concrete structures standard part 2 – commentary on the

design of concrete structures. Wellington: Standards New Zealand; 2006.

24. Ferreira L., de Brito J., Barra M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties // *Mag Concr Res.* 2011. Vol. 63(8). Pp. 17–27.

25. Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review // *Eur J Environ Civ Eng.* 2015. Vol. 19(7). Pp. 825–849.

26. Gayarre F.L., Pérez C.L.C., López M.A.S., Cabo AD. The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete // *Constr Build Mater.* 2014. Vol. 53. Pp. 260–266.

27. Lim J.C., Ozbakkaloglu T. Lateral strain-to-axial strain relationship of confined concrete // *J Struct Eng.* 2015. Vol. 141(5). 04014141.

Информация об авторах

Аль-Хаваф Али Фадиль Касим, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: alifadhel087@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Никулин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: nikulin137@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в февраль 2019 г.

© Аль-Хаваф А. Ф-К., Никулин А.И., 2019

^{1,*}*Al'-Khavaf A. F-K., ¹Nikulin A.I.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.*

**E-mail: alifadhel087@gmail.com*

DEFORMATION OF CENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH ADDITION OF CONCRETE RUBBLE AS COARSE AGGREGATE

Abstract. The article presents results of experimental studies of centrally compressed reinforced concrete columns with the addition of concrete rubble as coarse aggregate. Previous studies shows that recycled concrete in the form of crushed concrete rubble obtained from construction waste is an environmentally friendly alternative to traditional coarse aggregate for the manufacture of load-bearing structures. Currently, the scientific literature has a limited amount of information about the calculation methods to be used for the design of reinforced concrete columns with the addition of concrete rubble as coarse aggregate. In this paper, the experimental data on the physicomachanical properties of concrete available in the foreign and domestic literature are summarized. In addition, the deformation features of reinforced concrete columns are highlighted to substantiate the initial premises, hypotheses and possible limitations when developing methods for calculating centrally and eccentrically compressed elements from the specified concrete. Researches are analyzed related to the effect of different content of recycled concrete aggregate in the concrete, the number of longitudinal steel reinforcement in the cross section of the element and its yield strength, pitch and yield strength of transverse reinforcement on the deformability and bearing capacity of concrete columns with the addition of coarse aggregate from concrete rubble. The use of such concrete for the manufacture of centrally and eccentrically compressed concrete columns leads to an insignificant decrease in their bearing capacity. This indicates the possibility of recycling a significant amount of concrete rubble resulting from the processing of reinforced concrete structures destroyed during the demolition of buildings; it allows to attribute this technology to "green building".

Keywords: reinforced concrete, column, structural concrete, coarse aggregate, concrete rubble, columns bearing capacity, central compression, experimental research, generalization of results.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Murtazaev S.-A.Yu. Effective concretes and mortars for construction and restoration works using concrete scrap and dump ash of thermal power plants. *Vestnik MGSU.* 2008. № 3. Pp. 124-128.

2. Boltrik M., Malashkevich D., Pauli-chuk E. Main technical properties of secondary concrete aggregate. Poland: Technical University of Bialystok, 2007.

3. Murtazaev S.-A.U. Effective be-tones and solutions based on technogenic raw materials for repair and construction works: Auto-ref. dis. ... Dr.

Techn. Sciences: 05.23.05. Belgo-genus: BSTU. V.G. Shukhov, 2009. 43 p.

4. Murtazaev S.-A.Yu., Ismailova Z.Kh. Use of local industrial wastes in fine-grained concretes. *Stroitel'nye materialy*, 2013, no. 2008. № 3. Pp. 57–58.

5. Chen Z.P., Xu J.J., Xue J.Y., Su Y.S. Performance and calculations of recycle aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. *Int J Steel Struct.* 2014. Vol. 14(1). Pp. 31–42.

6. Islam M.J., Meherier M.S., Islam A.K.M. R. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 125 (Supplement C). 2016. Pp. 946–951.

7. Safiullah O., Elhem G., George W. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 108. Pp. 163–174.

8. Dos Santos J.R., Branco F., De Brito J. Mechanical properties of concrete with coarse recycled aggregates. *Struct Eng Int.* 2004. Vol. 3. Pp. 213–215.

9. Tabsh S.W., Abdelfatah A.S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr Build Mater.* 2009. Vol. 23(1). Pp. 163–167.

10. Dodds W., Goodier C., Christodoulou C., Austin S., Dunne D. Durability performance of sustainable structural concrete: effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. *Constr Build Mater.* 2017. Vol. 145. Pp. 183–195.

11. Cabral A.E.B., Schalch V., Molin D.C.C.D., Ribeiro J.L.D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24 (4). Pp. 421–430.

12. Pacheco J., de Brito J., Ferreira J., Soares D. Flexural load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Part 1. Pp. 65–71.

13. Silva R.V., Brito J., Evangelista L., Dhir R.K. Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2. *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 105. Pp. 144–156.

14. Tošić N., Marinković S., Ignjatović I.A. Database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison

to Eurocode 2 predictions. *Constr Build Mater.* 2016. Vol. 127. Pp. 932–944.

15. Wang Y.Y., Chen J., Zong B., Geng Y. Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs. *J Build Struct.* 2011. Vol. 32(12). Pp. 170–177.

16. Choi W.C., Yun H.D. Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Eng Struct.* 2012. Vol. 41(3). Pp. 285–293.

17. Breccolotti M., Materazzi A.L. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete. *Eng Struct.* 2010. Vol. 32(11). Pp. 3704–3712.

18. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress–strain model for confined concrete. *ASCE J Struct Eng.* 1998. Vol. 114(8). Pp. 1804–1826.

19. Xiao J.Z., Li J.B., Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cem Concr Res.* 2005. Vol. 35(6). Pp. 1187–1194.

20. Chinese Standard. GB 50010-2010. Code for design of concrete structures. Beijing: China Planning Press; 2010.

21. ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2011.

22. EN 1992-1-1. Eurocode 2: design of concrete structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN; 2004.

23. New Zealand Standard. NZS 3101: concrete structures standard part 2 – commentary on the design of concrete structures. Wellington: Standards New Zealand; 2006.

24. Ferreira L., de Brito J., Barra M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Mag Concr Res.* 2011. Vol. 63(8). Pp. 17–27.

25. Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. *Eur J Environ Civ Eng.* 2015. Vol. 19(7). Pp. 825–849.

26. Gayarre F.L., Pérez C.L.C., López M.A.S., Cabo A.D. The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater.* 2014. Vol. 53. Pp. 260–266.

27. Lim J.C., Ozbakkaloglu T. Lateral strain-to-axial strain relationship of confined concrete. *J Struct Eng.* 2015. Vol. 141(5). 04014141.

Information about the authors

Al'-Khavaf A. F-K. Postgraduate student. E-mail: alifadhel087@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nikulin, Alexander I. PhD, Associate Professor. E-mail: nikulin137@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in February 2019

Для цитирования:

Аль-Хаваф А. Ф-К., Никулин А.И. Деформирование центрально сжатых железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 66–76. DOI: 10.34031/article_5cd6df46bad533.65326025

For citation:

Al'-Khavaf A. F-K., Nikulin A.I. Deformation of centrally compressed reinforced concrete columns with addition of concrete rubble as coarse aggregate. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 66–76. DOI: 10.34031/article_5cd6df46bad533.65326025

DOI: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970

^{1,*} Кужахметова Э.Р.¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, 236016, Калининградская область, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14

*E-mail: elja_09@bk.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВАНТ В ЦИЛИНДРО-ПЛИТНО-ВАНТОВОМ (ЦПВ) ПОКРЫТИИ ЗДАНИЯ (СООРУЖЕНИЯ)

Аннотация. В статье рассмотрены расчетно-пространственные модели зданий с цилиндро-плитно-вантовым (ЦПВ) покрытием на вертикальную нагрузку и различными конструктивными схемами расположения вант: радиальной, веерной, параллельно-поперечной, параллельно-продольной и продольно-поперечной (перекрестной). Расчеты выполнены с помощью программного комплекса (ПК) FEMAP with NX NASTRAN с учетом геометрической нелинейности деформирования. Новизной исследования является комбинированная конструкция ЦПВ покрытия, представляющая собой комплекс разных видов покрытий, перекрывающих большие пролеты зданий (сооружений): в срединной части расположена цилиндрическая оболочка нулевой гауссовой кривизны и плиты плоского покрытия, а по краям от них – симметричные вантовые покрытия. Цель исследования – оценить влияние вантовых систем с разными схемами расположения вант на общую картину напряженно-деформированного состояния (НДС) ЦПВ покрытия здания. Задача исследования заключается в вариантно-сравнительном анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) комплексной (комбинированной) конструкции ЦПВ покрытия и в выборе оптимального конструктивного решения вантовой системы при одинаковых условиях (геометрических параметрах всего здания, внешних нагрузках и граничных закреплениях). Результаты расчета зданий с разными схемами расположения вант на горизонтальную (ветровую) нагрузку с учетом определения аэродинамических коэффициентов будут опубликованы в следующей статье.

Ключевые слова: вант, гибкая нить, вантовое покрытие, комплексное (комбинированное) покрытие, цилиндро-плитно-вантовое ЦПВ покрытие, полукольцо, наружный и внутренний опорный контур.

Введение. Широкое распространение вантовых конструкций обеспечивается возможностью применения современных высокопрочных материалов с относительно низким модулем упругости, характерным для стальных канатов одинарной и двойной свивки, которые, как правило, не используют в других несущих конструкциях. Поскольку вант работает только на растяжение, основным его достоинством является использование всей площади сечения стального каната, что, в случае выбора оптимальных характеристик, обеспечивает существенную экономию материала конструкции. При устройстве и монтаже вант не требуются леса и дополнительные подмости, что облегчает и упрощает возведение покрытия большепролетных зданий и сооружений, снижает экономические издержки. Однако повышенная деформативность вант вызывает существенное изменение их начальных геометрических параметров, что является недостатком вантовой конструкции [1]. Данную проблему можно решить на основании предварительного численного исследования, обеспечив требуемую жесткость, как самой вантовой системы, так и комплексной конструкции покрытия в целом. Предварительные расчетные исследования показали,

что геометрия вант оказывает существенное влияние на распределение их внутренних усилий, а также на величины реакций в опорных конструкциях [1] и на их перемещения [2, 3].

Основная часть. Цилиндро-плитно-вантовое (ЦПВ) покрытие – это единая комплексная конструкция волнообразной формы. Срединную часть покрытия представляет цилиндрическая оболочка нулевой гауссовой кривизны опирающаяся на бортовые элементы (продольные балки и торцевые арки), а по краям (справа и слева) цилиндрической оболочки расположены вантовые покрытия, образующие отдельные блоки – помещения общественного здания (рис. 1). Объединяющим конструктивным элементом (КЭ) цилиндрической оболочки и вантовой системы является плита плоского покрытия, воспринимающая их усилия от постоянной и временной нагрузки [4–7].

Данный вид покрытия позволяет перекрывать большие пролеты зданий (сооружений) с минимальными затратами (издержками), создавая при этом неповторимый архитектурный образ всего здания (сооружения).

Для исследования НДС ЦПВ покрытия рассмотрим конструкцию общественного здания – спортивного комплекса [8, 9].

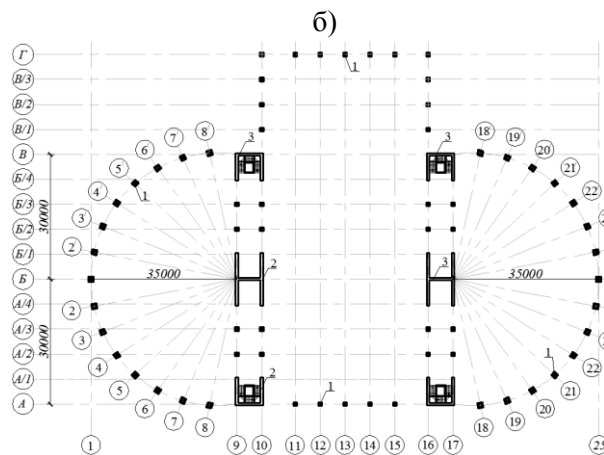
а)



Рис. 1. Общественное большепролетное здание с ЦВП покрытием:

а) общий вид; б) план здания

1 – колонна; 2 – продольная диафрагма; 3 – торцевая диафрагма



Объединяющим участком цилиндрической оболочки нулевой гауссовой кривизны и вантового покрытия является двухэтажное помещение с плоским покрытием. Железобетонные монолитные плиты покрытия и перекрытия толщиной 0,2 м опираются на колонны высотой $H_1=6$ м и продольно-поперечные диафрагмы в центральной части двухэтажного здания, а по краям - на систему элементов жесткости, состоящую из лестничных клеток и лифтовых шахт. Толщина диафрагм жесткости t , расположенных в торцах здания, а также в местах соединения вант, составляет 0,5 м, ширина $B=6$ м.

Пролет цилиндрической оболочки нулевой гауссовой кривизны принят $l_1=40$ м, длина $l_2=14 \times 6(\text{м})=84$ м, высота $h=4$ м, толщина монолитной цилиндрической оболочки $\delta=(1/200 \dots 1/300) l_2$ [10] (толщина принята $\delta=0,15$ м); радиус кривизны оболочки $R=52$ м. Бортовые конструктивные элементы (КЭ) цилиндрической оболочки выполнены в виде двух торцевых железобетонных арок и продольных балок прямоугольного сечения с размерами $b=0,5$ м $h=0,8$ м.

Вантовое покрытие образовано вантами и опорным наружным контуром в форме полукруга. На ванты укладываются железобетонные трапецевидные или квадратные плиты, которые крепятся к вантам с помощью арматурных выпусков [11]. Ванты оказываются в зазорах между железобетонными плитами. До заливки зазоров бетоном на расширяющемся цементе на плиты укладывается пригруз, вызывающий в вантах растягивающие усилия, близкие к расчетному сопротивлению их материала. Толщина железобетонных плит равна $t=0,05$ м [12]. Стрела провеса составляет $f=1/25L$, где L – пролет ванта, (м). Основной шаг вант $s_1=2$ м.

Наружный железобетонный опорный контур имеет форму немного вытянутого полукруга с радиусом R_i и представляет собой изогнутую балку.

Вдоль плиты плоского покрытия радиус составляет $R_1 = 30$ м (диаметр $D=60$ м), а поперек плиты – центральная часть опорного контура – $R_2=35$ м (см. рис. 16). Сечение полукруга прямоугольное с высотой $h=0,8$ м и шириной $b=1,5$ м. Наружный опорный контур установлен на колонны разной высоты $H = 12-16$ м. Сопряжение наружного опорного полукольца с ядром жесткости каркасного двухэтажного помещения – жесткое.

Таким образом, каркас общественного здания (рис. 1) представляет собой ЦПВ покрытие, опертное на железобетонные колонны, установленные по контуру здания и диафрагмы жесткости по торцам в зоне плоского покрытия. Сечение колонн – квадратное, с размерами $0,5 \times 0,5$ м, основной шаг колонн – 6 м. Высота колонн варьируется от 12 до 16 м.

Материал всех железобетонных конструкций – тяжелый бетон класса В25, с модулем упругости $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа (табл. 6.11 [13]). Значение модуля сдвига бетона принято равным $G_b = 0,4E_b = 0,4 \cdot 30 \cdot 10^3 = 12,0 \cdot 10^3$ МПа (п. 6.1.15 [13]). Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (п. 6.1.17 [13]). Расчетное сопротивление бетона для предельного состояния первой группы (сжатие осевое) $R_b=14,5$ МПа (табл. 6.8 [13]).

Материал вант – стальной канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции 6х36 (1+7+7/7+14)+1.о.с, с модулем упругости $E=1,47 \times 10^5$ МПа (табл. Г.10 [14]) и коэффициентом поперечной деформации $\nu = 0,3$ (табл. Г.10 [14]). Сечение вант принято согласно ГОСТ 7668 $\varnothing 72$ мм с расчетной площадью сечения всех проволок $A=2008,28$ мм² и ориентировочной массой смазанного каната $m=19,80$ кг/м.

В расчетах учтены вертикальные нагрузки от железобетонных плит покрытий, состава кровли и снеговой нагрузки, рассчитанной по двум вариантам согласно СП [15] (рис.2).

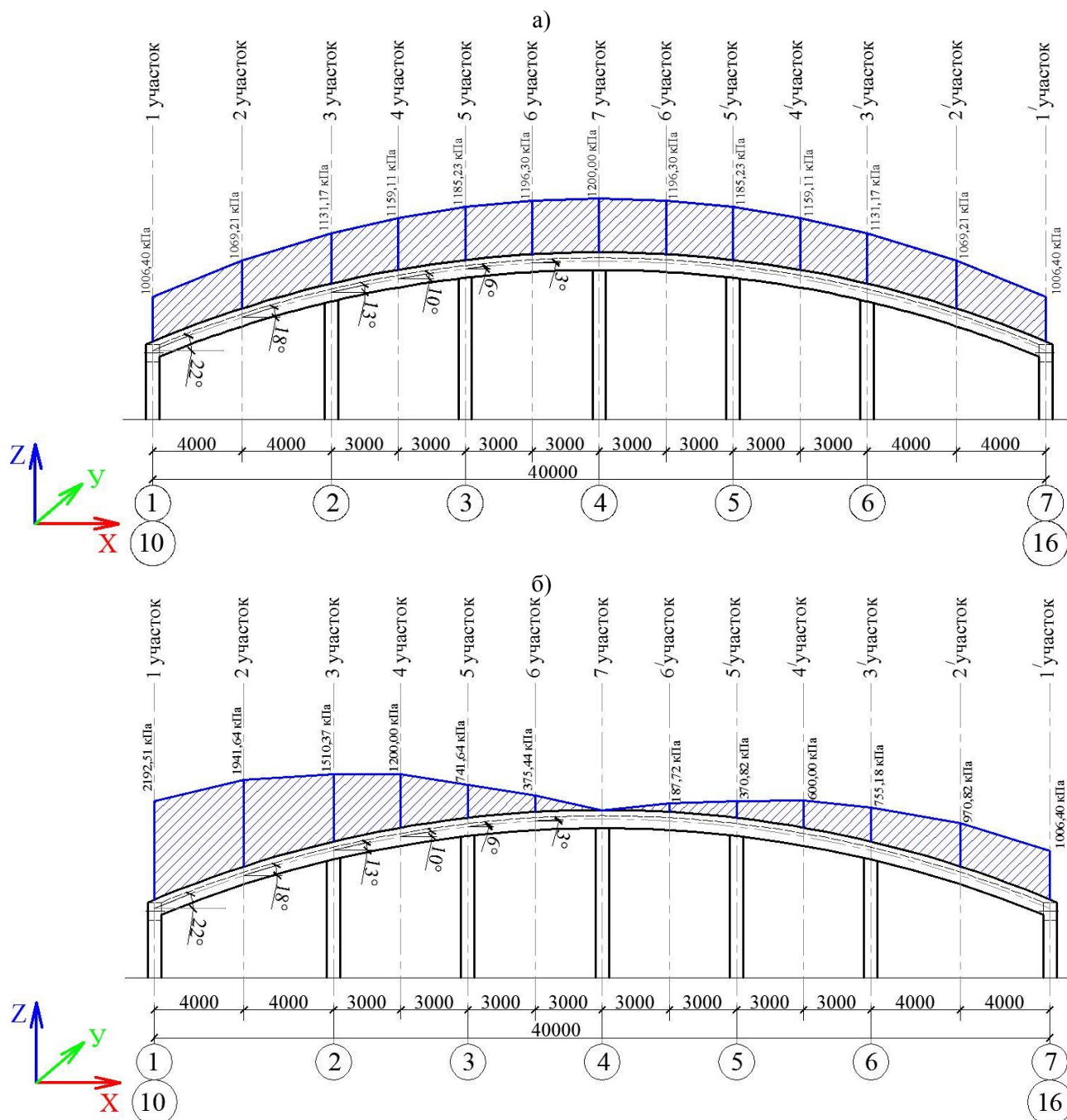


Рис. 2. Снеговая нагрузка (район - II) на цилиндрическое покрытие, рассчитанная по СП [15]:
а) вариант 1; б) вариант 2

В ходе исследования проанализированы следующие пространственно-расчетные модели ЦПВ покрытия с разными конструктивными схемами, нагруженные вертикальными нагрузками (рис. 2):

1. Расчетная модель каркаса здания №1 – ЦПВ покрытие с радиальной вантовой схемой (рис. 3, 10);
2. Расчетная модель каркаса здания №2 – ЦПВ покрытие с веерной вантовой схемой (рис. 5, 11);
3. Расчетная модель каркаса здания №3 – ЦПВ покрытие с параллельно-поперечной вантовой схемой (рис. 6, 12);

4. Расчетная модель каркаса здания №4 – ЦПВ покрытие с параллельно-продольной вантовой схемой (рис. 7, 13);

5. Расчетная модель каркаса здания №5 – ЦПВ покрытие с продольно-поперечной (перекрестной) вантовой схемой (рис. 9, 14).

Радиальная схема вантовой системы (рис. 3а) представляет собой комплекс вант, соединенных в пучок и сконцентрированных в центральной части цилиндрического покрытия. Одним концом ванты крепятся к металлическим петлям (рис. 4), установленные с равномерным основным шагом $s_1=2\text{м}$ вдоль наружного железобетонного опорного контура, имеющего форму

немного вытянутого полукруга с радиусом $R = 35\text{--}30$ м (рис. 1б). Другим концом ванты крепятся с шагом s_2 к внутреннему металлическому опорному полукольцу радиусом $r=0,5$ м, представляющий металлическую пластину толщиной $t = 0,2$ м и шириной $b^{\text{вн}}=0,8$ м.

Материал внутреннего полукольца – сталь марки С245 по ГОСТ 27772, с расчетным сопротивлением $R=350$ МПа (табл. В.5 [14]), модулем продольной упругости $E=2,1 \times 10^5$ МПа (табл. Г.10 [14]) и коэффициентом поперечной деформации $\nu = 0,3$ (табл. Г.10 [14]), коэффициентом линейного расширения $\alpha=0,12 \cdot 10^{-4}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Внутреннее металлическое опорное полукольцо жестко заделано в плиту плоского покрытия, концы которого соединены с армированием плиты и забетонированы. Длина заделки концов опорного полукольца определяется расчетам согласно нормативным документам.

На отдельные ванты приложена вертикальная нагрузка в виде трапеции [2, 3]. Ее величина пропорционально уменьшается от наружного опорного контура $R=35\text{--}30$ м к внутренней опоре

$r=0,5$ м вследствие уменьшения шага вант по внутреннему радиусу. Ванты максимально деформируются ближе к наружному полукругу и в срединной его части вантового покрытия (рис. 3а). Это объясняется тем, что:

❖ концы наружного опорного контура жестко закреплены в углах продольно-торцевой диафрагмы (ядра жесткости) плоского покрытия;

❖ длина вант, расположенных по наружному радиусу R_i опоры, зависит от пролета L и стрелы провеса $f=1/25L$, где $L=R_i$ – радиус полукруга. Максимальный наружный радиус равен $R_2=35$ м (центр полукруга). Ближе к плоскому покрытию наружный радиус R_i уменьшается до 30 м, следовательно, уменьшается и длина вант.

На рисунке 3б представлена деформированная модель наружного опорного контура с колоннами. Его расчетное перемещение по осям «х» и «у» составило 0,0061 м. В плане деформация наружного контура повторяет первоначальную форму полукруга ($R_i=30\text{--}35$ м), что является следствием пошагового расположения вант и равномерного их нагружения.

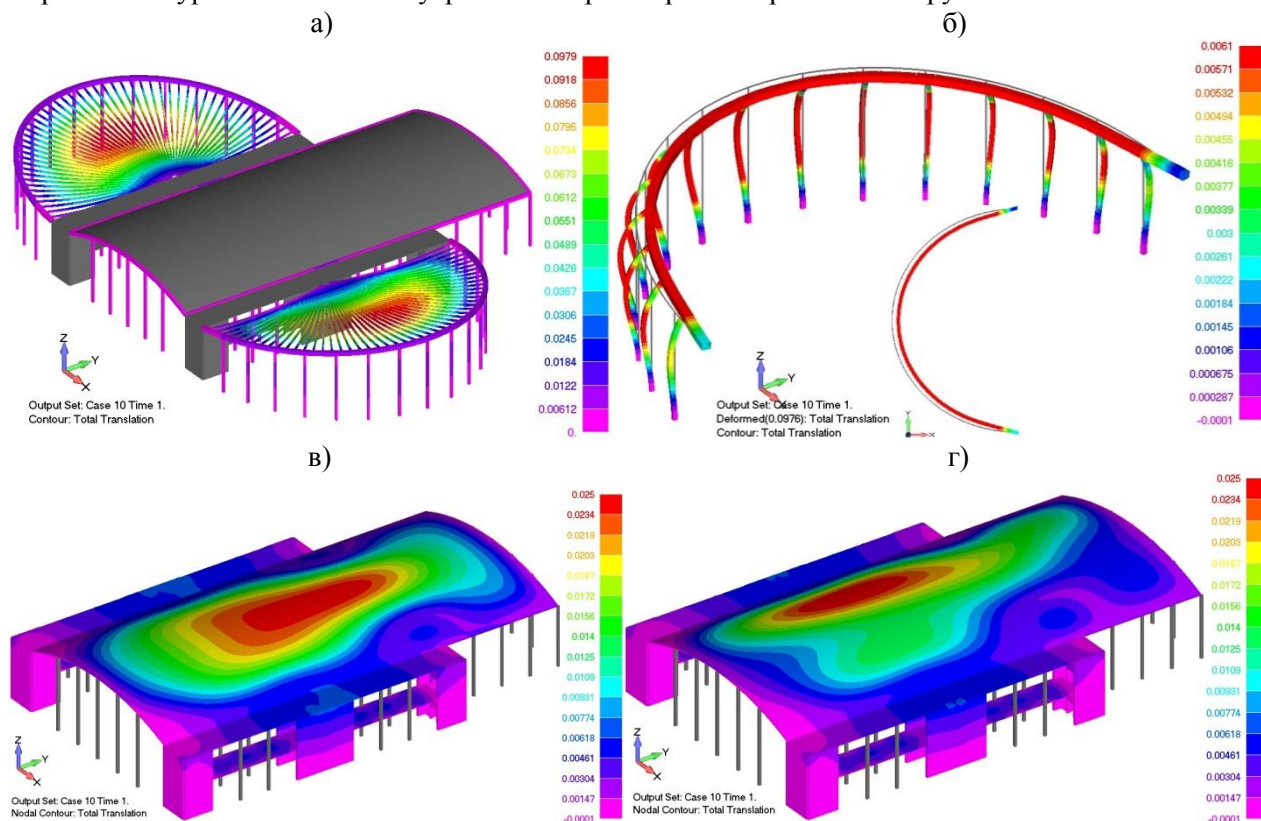


Рис. 3. Модель №1. Перемещения конструкций ЦПВ покрытия с радиальной схемой:

- а) вантового покрытия (максимальный прогиб вант $\Delta_1^{\text{max}}=0,0979$ м);
 б) наружного опорного полукруга ($\Delta_1^{\text{max}}=0,0061$ м); в) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 1 вар. ($\Delta_1^{\text{max}}=0,025$ м);
 г) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 2 вар. ($\Delta_1^{\text{max}}=0,025$ м)

Постоянная нагрузка на цилиндро-плитное покрытие включает следующие компоненты: от собственного веса железобетонного цилиндро-

плитного покрытия, состава кровли и временной снеговой нагрузки, посчитанной согласно СП [15] (рис. 2а). На рисунках 3в) и 3г) показаны

максимальные прогибы ($\Delta_1^{\max} = 0,025$ м) покрытия от постоянной и снеговой нагрузки (варианты 1 и 2).

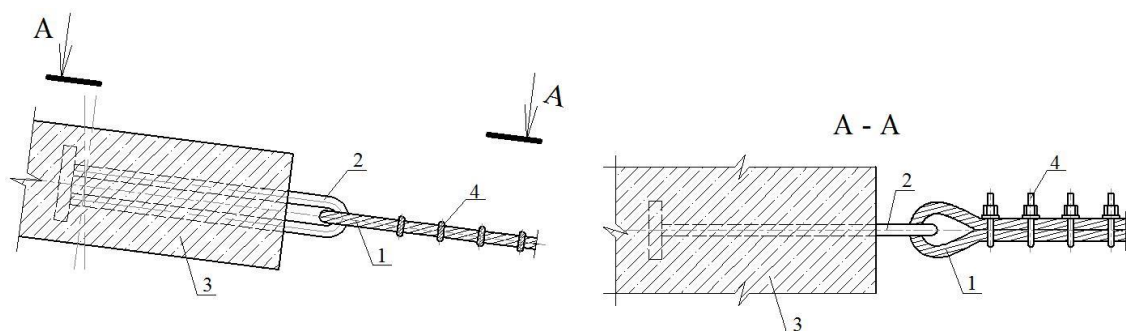


Рис. 4. Крепление вант к наружному опорному контуру вантового покрытия с помощью закладной детали «петля»: 1 – вант (стальной трос); 2 – закладная деталь (ЗД) в виде петли; 3 – наружный железобетонный опорный контур; 4 – хомут

При **верной** схеме (рис. 5а) ванты равномерно расположены по наружному контуру с основным шагом $s_1=2$ м, а вдоль плоского покрытия – с малым шагом s_3 . Шарнирное соединение вант выполнено с помощью металлических закладных деталей (ЗД) в виде «петли» (рис. 4), концы которых заанкерены в монолитную железобетонную наружную опору и плиту плоского покрытия.

Нагрузка на отдельный вант приложена в виде трапеции [2, 3]. Величина, которой зависит от шага вант $s_2 > s_i > s_3$, изменяющийся по ее длине.

Перемещение наружного опорного полукруга представлено на рис. 5б. Деформированная схема полукруга после растяжения вант стала походить на букву «С». Деформация наружного опорного полукруга по оси «х» вызвана нагруженностью длинных вант в срединной части (см. рис. 5а) и составила $\Delta_x=0,03$ м. Ванты, расположенные ближе к краям полукруга, имеют меньшую длину и соответственно меньший вес. Отсюда, прогиб от вышележащей нагрузки по оси «у» равен $\Delta_y=0,02$ м.

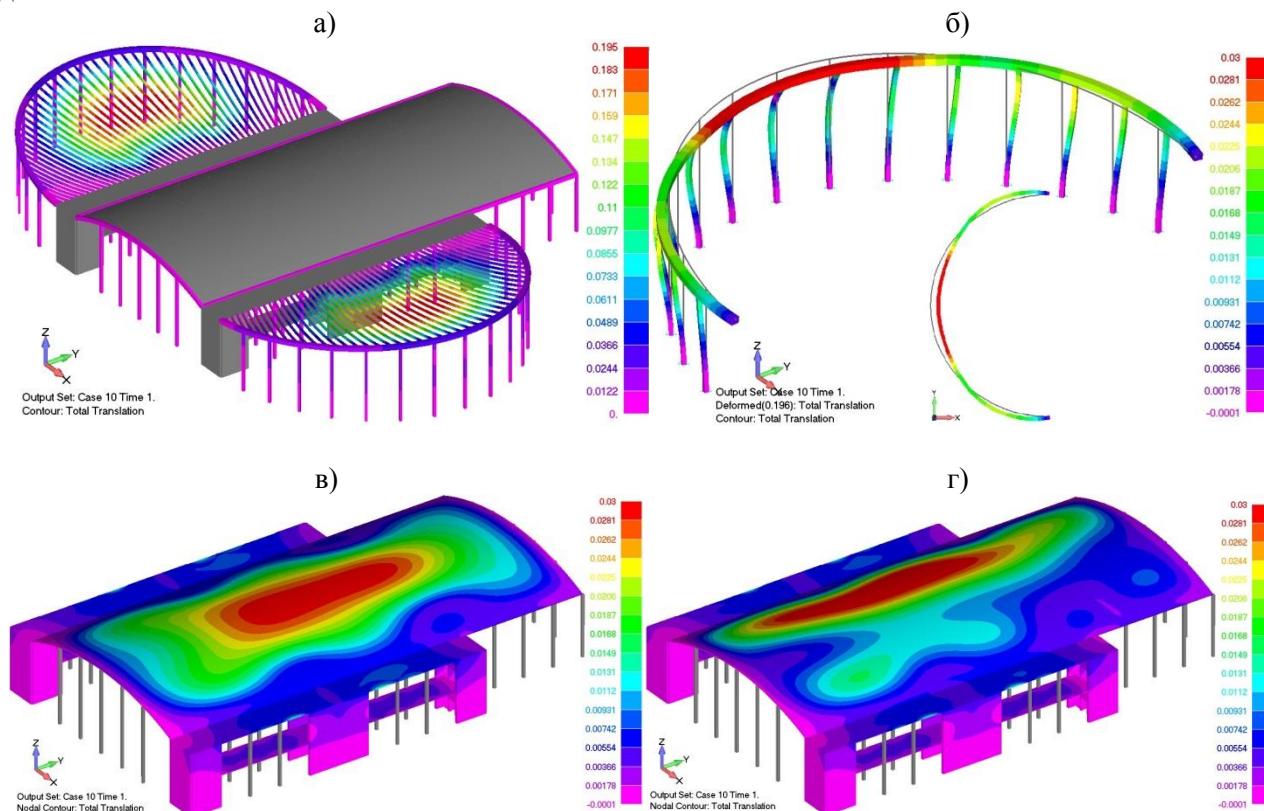


Рис. 5. Модель №2. Перемещения конструкций ЦПВ покрытия с верной схемой:

- а) вантового покрытия (максимальный прогиб вант $\Delta_2^{\max} = 0,195$ м); б) наружного опорного полукруга ($\Delta_2^{\max} = 0,03$ м); в) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 1 вар. ($\Delta_2^{\max} = 0,030$ м); г) цилиндро-плитное покрытия с учетом снеговой нагрузки по 2 вар. ($\Delta_2^{\max} = 0,030$ м)

Прогиб цилиндрической оболочки от снеговой нагрузки, рассчитанной по варианту 1 представлен на рис. 5в, а по варианту 2 – на рисунке 5г. Как и при радиальной схеме вантового покрытия (см. рис. 3в) максимальный прогиб ($\Delta=0,03$ м) находится в зоне цилиндро-плитного покрытия. Однако за счет верного расположения вант и максимального их перемещения область максимального прогиба цилиндро-плитного покрытия значительно увеличина.

Параллельно-поперечная схема вантового покрытия представляет собой параллельное расположение вант перпендикулярно к плоскому покрытию (рис. 6а). Основной шаг вдоль плоского покрытия равен $s_1=2$ м. Соответственно

геометрические параметры вант (длина S и стрела провеса f) изменяются от центра полукруга к краевым его участкам.

На ванты приложена равномерно – распределенная нагрузка $q = 8550$ Н/м [2, 3], поскольку основной шаг $s_1=2$ м по всей длине вант постоянный. На рисунке 6а показано перемещение Δ вант, максимальное значение, которого составило 0,297 м.

Прогиб вант под вертикальной (поперечной) нагрузкой приводит к сжатию наружного опорного полукруга. Параллельно-поперечное расположение и разная длина вант одинаково влияют на деформацию полукруга ($\Delta=0,053$ м) в плане по осям «х» и «у» от первоначальной ее формы (рис. 5б).

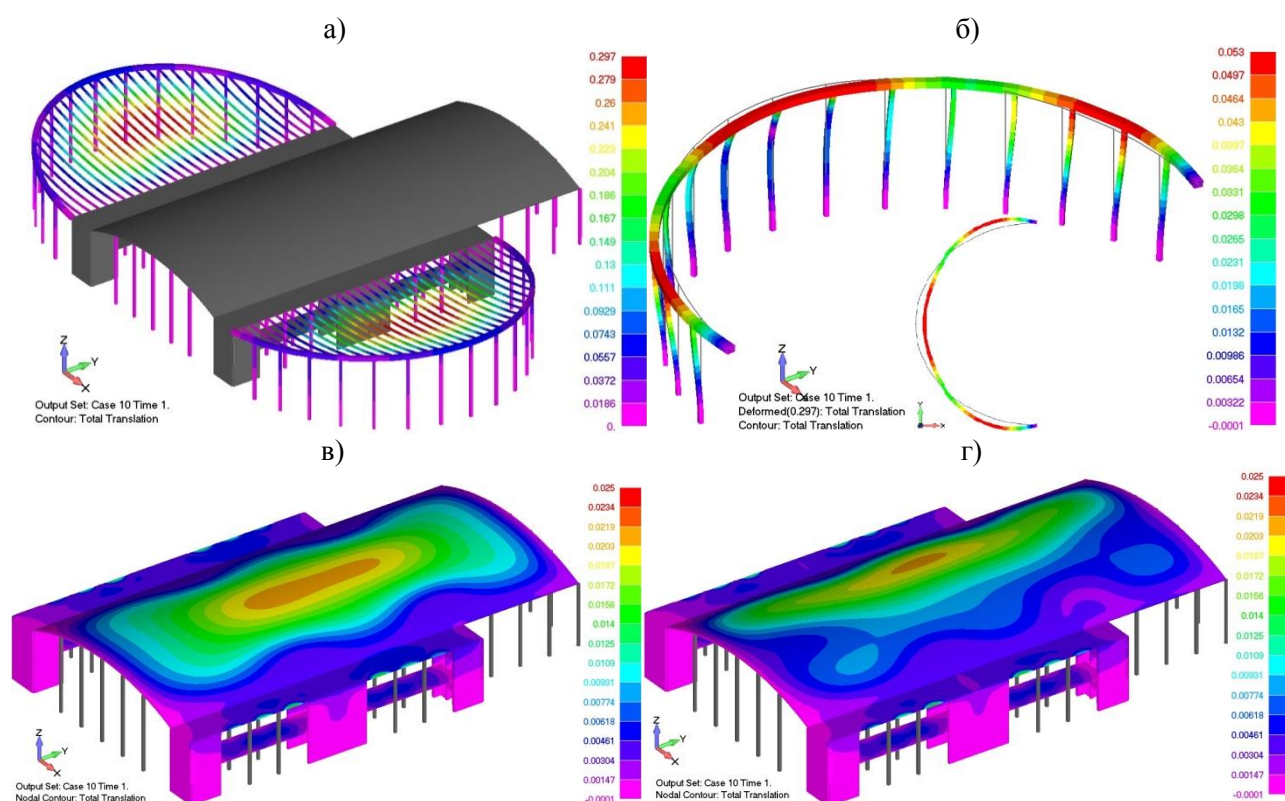


Рис. 6. Модель №3. Перемещения конструкций ЦПВ покрытия с параллельно – поперечной схемой: а) вантового покрытия (максимальный прогиб вант $\Delta_3^{\max}=0,297$ м); б) наружного опорного полукольца ($\Delta_3^{\max}=0,053$ м); в) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 1 вар. ($\Delta_3^{\max}=0,020$ м); г) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 2 вар. ($\Delta_3^{\max}=0,020$ м)

Прогибы цилиндрической оболочки от снеговой нагрузки, рассчитанной по вариантам 1 и 2 представлены соответственно на рисунках 6в и 6г. Для параллельно-поперечной схемы вант максимальный прогиб цилиндро-плитного покрытия составил $\Delta=0,020$ м. В отличие от предыдущих схем вантовой системы зона максимального прогиба минимальна и имеет равномерно-распределенную область.

При **параллельно – продольной** схеме висячего покрытия ванты расположены вдоль

цилиндрического покрытия, т.е. как хорды, разбивают полукруг на отрезки. Расстояние между соседними вантами $s_1=2$ м (рис. 7а). Несмотря на большую длину крайних вант (около плоского покрытия) и стрелу провеса f перемещение их составило $\Delta=0,4$ м, а в срединной части, где длина вант меньше, прогиб равен $\Delta=1,671$ м. Таким образом, из-за жесткого соединения наружного опорного полукруга с плитой плоского покрытия длинные ванты подвержены меньшему деформированию.

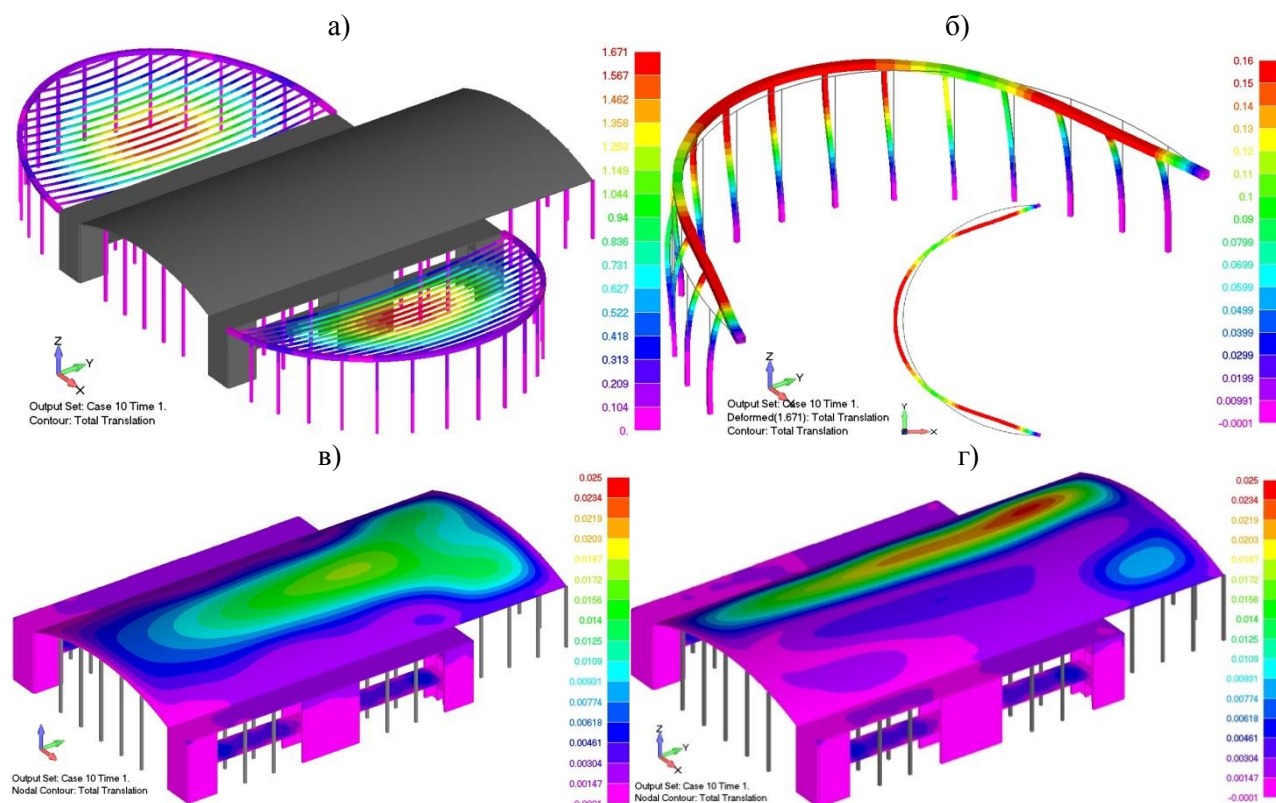


Рис. 7. Модель №4. Перемещения конструкций ЦПВ покрытия с параллельно – продольной схемой: а) вантового покрытия (максимальный прогиб вант $\Delta_4^{\max} = 1,671$ м); б) наружного опорного полукольца ($\Delta_4^{\max} = 0,16$ м); в) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 1 вар. ($\Delta_4^{\max} = 0,015$ м); г) цилиндро-плитное покрытия оболочки с учетом снеговой нагрузки по 2 вар. ($\Delta_4^{\max} = 0,023$ м)

Наружный опорный контур в форме полу-круга перемещается по осям «х» и «у» с одинаковым значением $\Delta = 0,16$ м (рис. 7б). Деформированная схема полу-круга в плане похожа на полу-эллипс. Самые длинные и, соответственно, самые нагруженные ванты, находящиеся ближе к краям полу-круга (около плоского покрытия), сжимают опорный контур. А ванты меньшей длины в срединной части из-за меньшего сопротивления деформируются за пределы первоначальной формы полу-круга.

Как видим, прогиб цилиндро-плитного покрытия зависит от действующих на нее вертикальных нагрузок: собственного веса железобетонного цилиндро-плитного покрытия, состава кровли, снеговой нагрузки (рис. 2). Параллельно-

продольное расположение вант не влияет на деформационную схему цилиндро-плитного покрытия, в сравнении с вышеуказанными схемами вантовой системы. Максимальный прогиб цилиндрической оболочки составил $\Delta = 0,015$ м (рис. 7в).

Максимальный прогиб цилиндрической оболочки, посчитанной с учетом снеговой нагрузки по варианту 2, показан на рисунке 2б.

Комбинация поперечно-продольной (перекрестная) схемы представляет собой ванты в продольном и поперечном направлениях, соединенные двойными хомутами (рис. 8), образуя между собой точечную связку с равномерным шагом $s_1 = 2$ м по всей длине ванта.

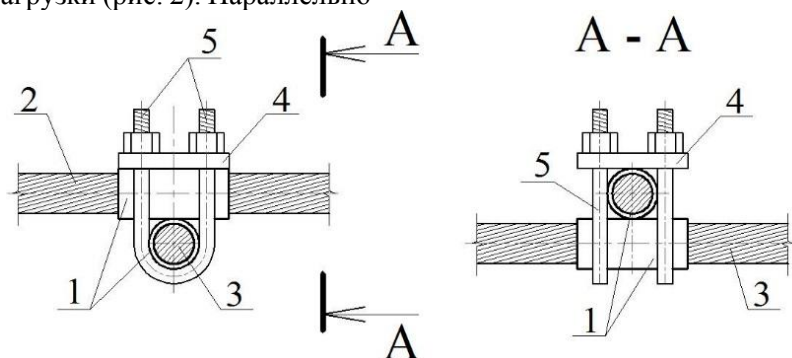


Рис. 8. Узел пересечения вант на двойных хомутах

1 – кожух из оцинкованной стали или капрона; 2 – вант в продольном направлении; 3 – вант в поперечном направлении; 4 – металлическая пластина; 5 – хомуты (стяжные болты)

Перекрестная (продольно-поперечная) схема вант позволяет равномерно распределять нагрузки на ванты от вышележащих конструкций таким образом, что перемещения и расчетные усилия в вантах, наружном опорном контуре в

форме полукруга $R=30\text{--}35\text{ м}$ (центр $R=35\text{ м}$) и в цилиндрической оболочке оказываются незначительными, по сравнению с другими схемами (см. рис. 3–7)

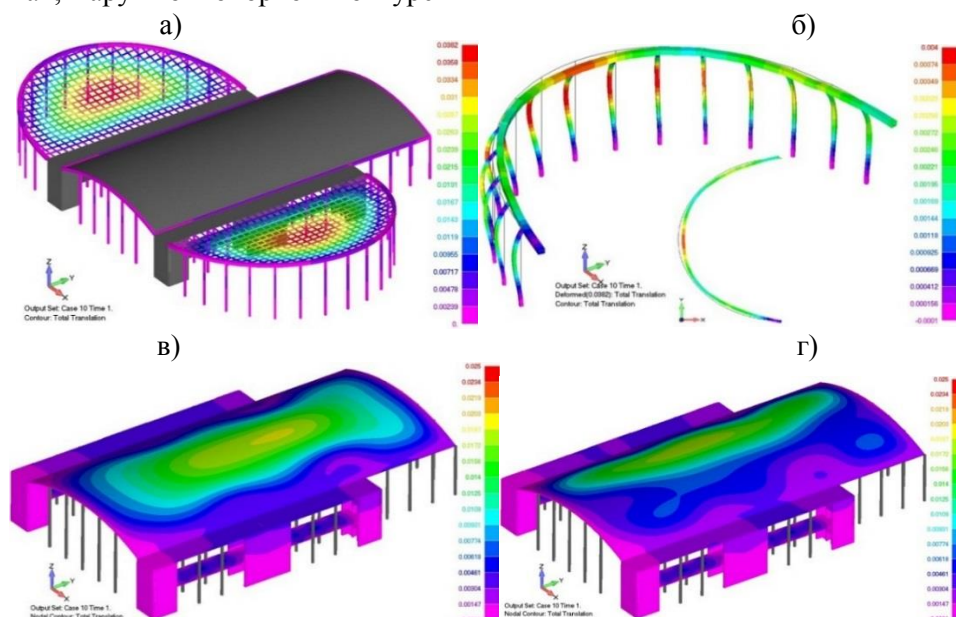


Рис. 9. Модель №5. Перемещения конструкций ЦПВ покрытия с перекрестной схемой:

- а) вантового покрытия (максимальный прогиб вант $\Delta_5^{\max}=0,0727\text{ м}$); б) наружного опорного полукольца ($\Delta_5^{\max}=0,008\text{ м}$); в) цилиндро-плитного покрытия с учетом снеговой нагрузки по 1 вар. ($\Delta_5^{\max}=0,020\text{ м}$); г) цилиндро-плитное покрытия с учетом снеговой нагрузки по 2 вар. ($\Delta_5^{\max}=0,020\text{ м}$)

Выбор данной схемы позволяет уменьшить сечения в комбинированной системе ЦПВ покрытия или отдельных конструктивных элементов (КЭ), а также изменить материалы, например, уменьшить класс бетона или стали. Данный фактор является экономически эффективным показателем для проектирования и строительства зданий (сооружений). Судя по результатам расчета, продольно-поперечная схема вантовой системы обладает повышенной жесткостью, ведь ванты в

продольном и поперечном направлении соединены между собой в перекрестную систему с помощью крепежных элементов (рис. 8). Отсюда совместная работа вант в продольно-поперечном направлении незначительно влияет на деформацию цилиндрического покрытия (рис. 9в).

Результаты расчетов большепролетного здания ЦПВ покрытия с разными конструктивными схемами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов ЦПВ покрытия

№ п/п	Наименование расчетных моделей	Максимальные перемещения Δ , (м) конструктивных элементов (КЭ) ЦПВ покрытия:			
		Вантовой системы	Цилиндрической оболочки	Наружного опорного контура:	
				По оси «х»	По оси «у»
1.	ЦПВ покрытие с радиальной вантовой схемой	0,0979	0,025	0,006	0,006
2.	ЦПВ покрытие с веерной вантовой схемой	0,1960	0,025	0,030	0,020
3.	ЦПВ покрытие с параллельно-поперечной вантовой схемой	0,2970	0,020	0,053	0,053
4.	ЦПВ покрытие с параллельно-продольной вантовой схемой	1,6710	0,015	0,160	0,160
5.	ЦПВ покрытие с продольно-поперечной (перекрестной) вантовой схемой	0,0382	0,017	0,004	0,002

Проведен сравнительный анализ напряженного состояния для вантового покрытия с разными схемами расположением вант. Более наглядно представлены продольные усилия N (Н)

для вантового покрытия, а, именно, для вант и наружного опорного контура от вертикальной нагрузки (см. рис. 10-14).

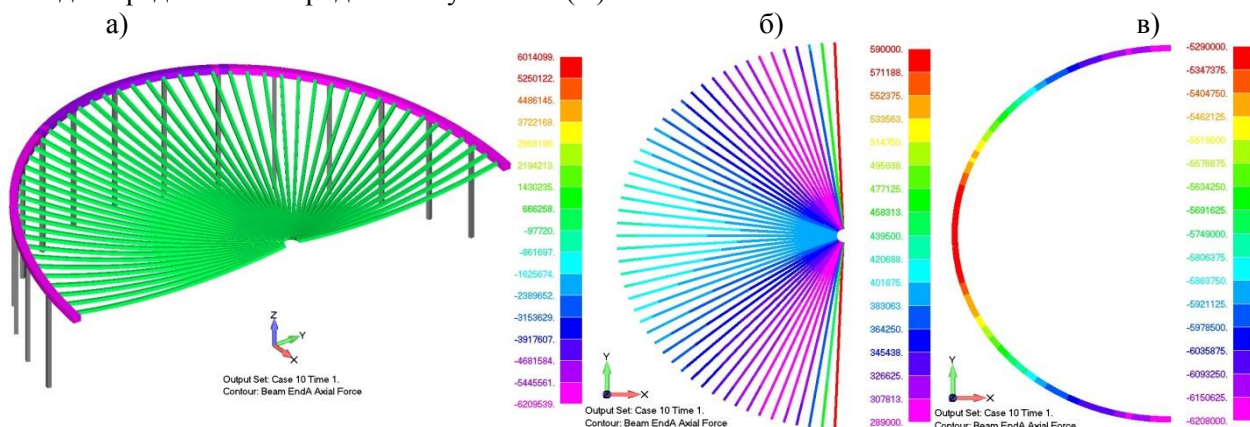


Рис. 10. Модель № 1. Продольные усилия N (Н):

а) модель вантового покрытия; б) ванты с радиальной схемой; в) наружный опорный контур

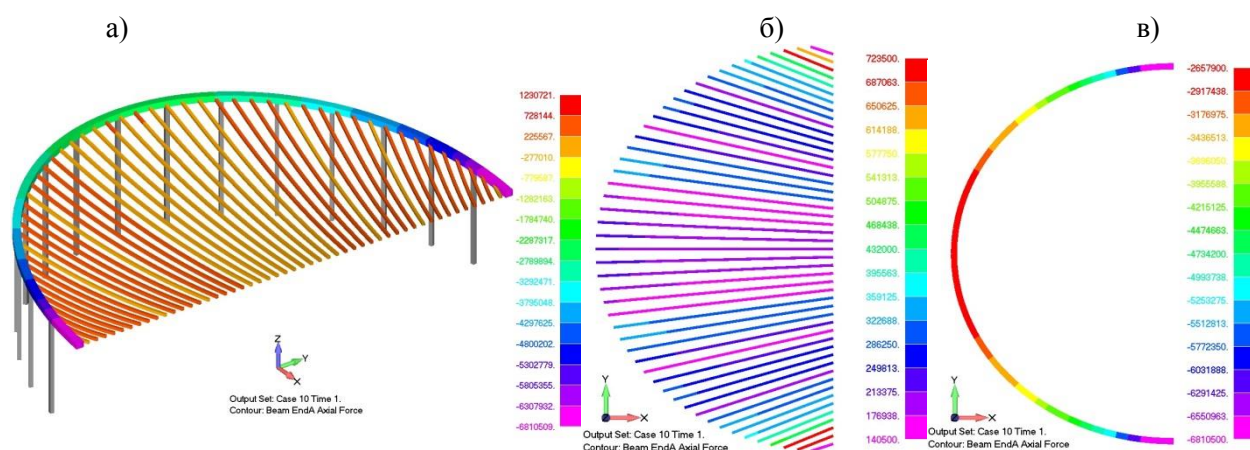


Рис. 11. Модель № 2. Продольные усилия N (Н):

а) модель вантового покрытия; б) ванты с веерной схемой; в) наружный опорный контур

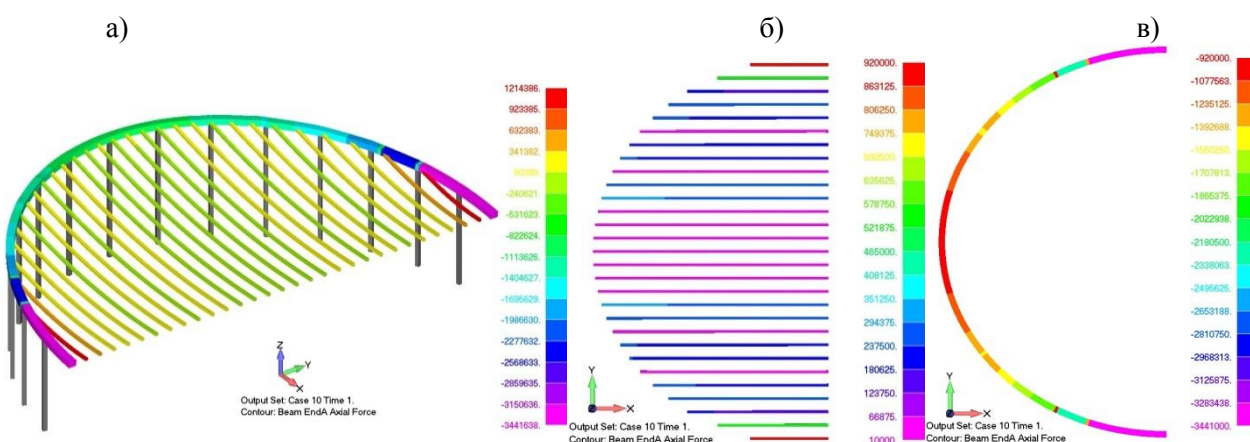
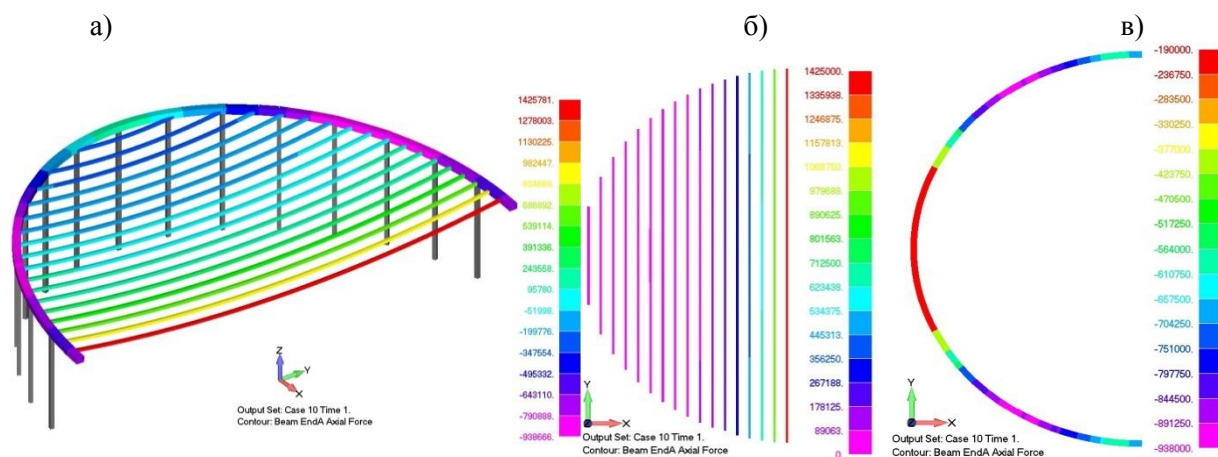
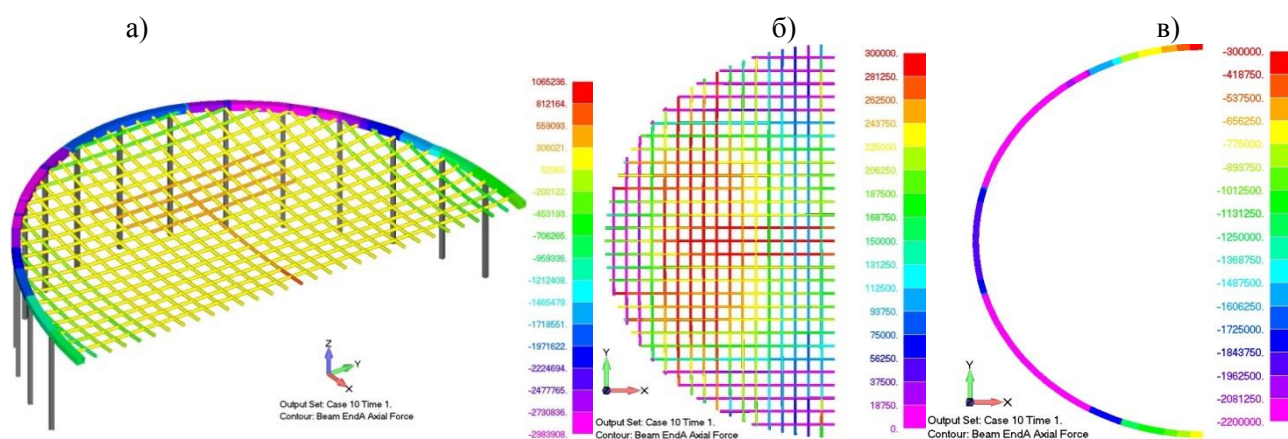


Рис. 12. Модель № 3. Продольные усилия N (Н):

а) модель вантового покрытия; б) ванты с параллельно – поперечной схемой; в) наружный опорный контур

Рис. 13. Модель № 4. Продольные усилия N (Н):

а) модель вантового покрытия; б) ванты с параллельно – продольной схемой; в) наружный опорный контур

Рис. 14. Модель № 5. Продольные усилия N (Н):

а) модель вантового покрытия; б) ванты с продольно-поперечной схемой; в) наружный опорный контур

Результаты расчетов вантового покрытия с продольными усилиями вант и наружного опорного контура приведены в таблице №2.

Заключение. Сопоставительный анализ эффективности различных вантовых схем комплексного ЦПВ покрытия показал, что расположения вант значительно влияют на деформированную схему наружного опорного контура в форме полукруга и цилиндрического покрытия:

1. При радиальной и продольно-поперечной (смешанной) схемах расположения вант деформированная схема полукруга практически повторяет свою первоначальную форму из-за равномерно-расположенных и равномерно-нагруженных вант (рис. 3б, 9б).

2. Очертание деформированной наружной опоры при схемах висячего покрытия: веерной, параллельно – поперечной и параллельно-продольной напоминает букву «С» или полуэллипс из-за максимальных перемещений длинных вант

в срединной части висячего покрытия и малой сопротивляемости коротких вант (рис. 5б-7б).

3. Большое и практически похожее влияние на НДС цилиндрического покрытия оказывают радиальная и веерная схемы. Среднее влияние – параллельно-поперечная и продольно-поперечная (смешанная) схемы. При параллельно-продольном расположении вант НДС цилиндрического покрытия существенно зависит от вышележащих вертикальных нагрузок (см. рис. 7в), поскольку шарнирное крепление вант выполнено только по контуру наружного полукольца (рис. 7а).

4. Согласно результатам расчетов (см. табл. 1, 2), продольно-поперечная (перекрестная) схема №5 обеспечивает существенно меньшие, в сравнении с другими рассмотренными схемами, перемещения и усилия в ЦПВ покрытия при одинаковых геометрических параметрах конструкции здания, его внешних нагрузках и граничных закреплениях конструктивных элементов.

Таблица 2

Результаты расчетов вантового покрытия

№ п/п	Наименование расчетных моделей	Максимальные продольные усилия N , (Н) конструктивных элементов (КЭ):	
		Вант	Наружного опорного контра:
1.	ЦПВ покрытие с радиальной вантовой схемой	+ 590 000	- 6 200 800
2.	ЦПВ покрытие с веерной вантовой схемой	+ 723 500	- 6 810 500
3.	ЦПВ покрытие с параллельно-поперечной вантовой схемой	+ 920 000	- 3 441 000
4.	ЦПВ покрытие с параллельно-продольной вантовой схемой	+ 1 425 000	- 938 000
5.	ЦПВ покрытие с продольно-поперечной (перекрестной) вантовой схемой	+ 300 000	-2 200 000
Примечания: 1. Знаком «+» обозначены растягивающие усилия. 2. Знаком «-» обозначены сжимающие усилия.			

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кужахметова Э.Р. Сравнительный анализ работы вант с разной геометрической характеристикой при вертикальном нагружении // Известия Калининградского государственного технического университета. 2017. №45. С. 235–244.

2. Кужахметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // Балтийский морской форум: материалы VI Международного Балтийского морского форума 2018 года: «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве»: IV Международная конференция, (Калининград, 3-6 сентября 2018). Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2018. Т. 6. С.129–140.

3. Кужахметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // Известия Калининградского государственного технического университета. 2019. №52. С. 154–168.

4. Кужахметова Э.Р. Методика прочностного расчета комбинированной цилиндрико-плитовантовой конструкции покрытия большепролетного здания // Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава АГТУ (57 ППС). Астрахань, 2013.

5. Кужахметова Э.Р. Определение прочности, устойчивости и колебаний здания с комплексным цилиндрико-плитовантовым покрытием // Международная научная конференция научно-педагогических работников АГТУ (58 НПР). Астрахань, 2014.

6. Кужахметова Э.Р. Конструирование и расчет цилиндрико-плитовантового покрытия // Международная научная конференция научно-педагогических работников АГТУ (59 НПР). Астрахань, 2015.

7. Кужахметова Э.Р. Особенности напряженно-деформированного состояния здания с цилиндрико-плитовантовым покрытием // Вестник науки. Сборник статей по материалам XII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки». Томск, 2018. С. 93–98.

8. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №11 (166). С. 42–45.

9. Сапожников А.И. Жизнь зданий в земной стихии. Германия: LAP LAMBER Academic Publishing, 2014. 60 с.

10. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: общий курс. Учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 767 с.

11. Кужахметова Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №2. С. 39–48.

12. Трубец А.Г. Пространственные металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.

13. СП 63.13330.2011. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. СНиП 52-01-2003 с изм. №1. М., 2011.

14. СП 16.13330.2011. Свод правил Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2011.

15. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2016.

Информация об авторах

Кузахметова Эльвира Рафаэлевна, аспирант кафедры машиноведения и технических систем. Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта. Email: elja_09@bk.ru. Россия, 236016, Калининградская область, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14.

Поступила в февраль 2019 г.

© Кузахметова Э.Р., 2019

^{1,*}**Kuzhakhmetova E.R.**

¹Immanuel Kant Baltic Federal University;

Russia, 236016, Kaliningrad region, Kaliningrad, ul. Alexander Nevsky, 14

*E-mail: elja_09@bk.ru

CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF GUYS LOCATION IN CYLINDRICAL-SLAB-GUY COVERING OF BUILDING (CONSTRUCTION)

Abstract. The article discusses the design and spatial models of buildings with a cylinder-slab-cable-stayed coating and various design schemes for the location of the cables: radial, fan-shaped, parallel-transverse, parallel-longitudinal and longitudinal-transverse (cross). The calculations were performed using the software package FEMAP with NX NASTRAN, taking into account the geometric nonlinearity of deformation. The novelty of the research is the combined design of the CPV coating, which is a complex of different types of coatings spanning large spans of buildings (structures): in the middle part there is a cylindrical shell of zero Gaussian curvature and a flat coating plate, and symmetrical cable-stayed coatings at the edges. The purpose of the study is to assess the effect of cable-stayed systems with different cable layouts on the overall picture of the stress-strain state of the CPV of the building. The task of the study is to alternatively - a comparative analysis of the stress-strain state of the complex (combined) design of the CPV coating and to select the optimal structural solution of the cable system under the same conditions (geometric parameters of the whole building, external loads and boundary fixings). The results of the calculation of buildings with different schemes of arrangement of cables for horizontal (wind) load, taking into account the definition of aerodynamic coefficients, will be published in the next article.

Keywords: cable, flexible thread, cable-stayed coating, complex (combined) coating, cylinder-slab-guyed coating, half ring, outer and inner bearing contour

REFERENCES

1. Kuzhakhmetova E.R. Comparative analysis of the work of the guys with different geometric characteristics under vertical loading [Sravnitel'nyj analiz raboty vant s raznoj geometricheskoj harakteristikoj pri vertikal'nom nagruzhении]. News of Kaliningrad State Technical University. 2017. No. 45. Pp. 235–244. (rus)
2. Kuzhakhmetova E. R. Deformation of guys under different loading conditions [Deformaciya vant pri razlichnyh usloviyah nagruzheniya]. Baltijskij morskij forum: materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma 2018 goda: «Progressivnye tekhnologii, mashiny i mekhanizmy v mashinostroenii i stroitel'stve»: IV Mezhdunarodnaya konferenciya, (Kaliningrad, 3-6 sentyabrya 2018). Kaliningrad: Izd-vo BGARF FGBOU VO «KGTU», 2018, Vol. 6. Pp. 129–140. (rus)
3. Kuzhakhmetova E.R. Deformation of guys under different loading conditions [Deformaciya vant pri razlichnyh usloviyah nagruzheniya]. News of Kaliningrad State Technical University. 2019. No. 52. Pp. 154–168. (rus)
4. Kuzhakhmetova E.R. Methodology for the strength calculation of the combined cylinder-slab-cable construction of a large-span building covering [Metodika prochnostnogo rascheta kombinirovannoj cilindro-plito-vantovoj konstrukcii pokrytiya bol'sheproletnogo zdaniya] Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya professorsko-prepodavatel'skogo sostava AGTU (57 PPS). Astrahan', 2013.2013. (rus)
5. Kuzhakhmetova E.R. Determination of strength, stability and vibrations of a building with a complex cylinder-slab-guyed floor [Opredelenie prochnosti, ustojchivosti i kolebanij zdaniya s kompleksnym cilindro-plito-vantovym pokrytiem]. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov AGTU (58 NPR). Astrahan', 2014. (rus)
6. Kuzhakhmetova E.R. Designing and calculating a cylinder-slab-guyed coating [Konstruirovaniye i raschet cilindro-plito-vantovogo pokrytiya]. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov AGTU (59 NPR). Astrahan', 2015. (rus)
7. Kuzhakhmetova E.R. Features of the stress-strain state of a building with a cylinder-slab-guyed

floor [Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zdaniya s cilindro-plito-vantovym pokrytiem]. Vestnik nauki. Sbornik statej po materialam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki». Tomsk, 2018. Pp. 93–98. (rus)

8. Kuzhakhmetova E.R., Sapozhnikov A.I. Architectural expressiveness and physiological expediency of buildings with curvilinear surfaces [Arhitekturnaya vyrazitel'nost' i fiziologicheskaya celesoobraznost' zdaniy s krivolinejnymi poverhnostyami]. Building materials, equipment, technologies of the 21st century. 2012. No. 11 (166). Pp. 42–45. (rus)

9. Sapozhnikov A.I. The life of buildings in the earth element [Zhizn' zdaniy v zemnoj stihii]. Germany: LAP LAMBER Academic Publishing. 2014, 60 p. (rus)

10. Baikov V.N., Sigalov E.E. Reinforced concrete structures [Zhelezobetonnye konstrukcii: obshchij kurs] Ucheb. dlya vuzov. 5-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1991, 767p. (rus)

11. Kuzhakhmetova E.R. Methods for calculating cable and cable-stayed structures [Metody rascheta vant i vantovyh konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 2. Pp. 39–48. (rus)

12. Trushchev A. G. Spatial metal structures: [Prostranstvennye metallicheskie konstrukcii] Proc. manual for universities. M.: Stroyizdat. 1983, 215 p. (rus)

13. SP 63.13330.2011. Concrete and reinforced concrete structures [Svod pravil. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii]. SNiP 52-01-2003 rev, no. 1. (rus)

14. SP 16.13330.2011. Steel construction. Updated edition [Svod pravil. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya] SNiP II-23-81*. (rus)

15. SP 20.13330.2011. Loads and impacts [Svod pravil. Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya]. SNiP 2.01.07-85*. (rus)

Information about the authors

Kuzhakhmetova, Elvira R. Postgraduate student. E-mail: elja_09@bk.ru. Immanuel Kant Baltic Federal University. Russia, 236016, Kaliningrad, st. A. Nevskogo, 14

Received in February 2019

Для цитирования:

Кузахметова Э.Р. Конструктивные решения расположения вант в цилиндрично-плитно-вантовом (цпв) покрытии здания (сооружения) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 77–89. DOI: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970

For citation:

Kuzhakhmetova E.R. Constructive solutions of guys location in cylindrical-slab-guy covering of building (construction). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 77–89. DOI: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970

DOI: 10.34031/article_5ce292c50f67f9.02927539

^{1,*}Давиденко П.В., ¹Кладиев Н.Н., ¹Наумов А.Е., ¹Жариков И.С., ²Ерижкова Е.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

*E-mail: davidenkopolly@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ НЕЗАВЕРШЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ

Аннотация. При производстве строительно-технических экспертиз целесообразности завершения объектов незавершенного строительства решаются задачи исследования текущего и оценки прогнозируемого напряженно-деформированного состояния строительных конструкций. Существенное влияние на прогностические оценки оказывает факт того, что незавершенный полностью объект находится в существенно различных стадиях завершенности его отдельных фрагментов. В работе представлен авторский опыт конечноэлементного моделирования работы конструкций незавершенного железобетонного каркасного здания с учетом его фактической поэлементной завершенности и практическая методика оценки на этой основе прогнозных значений деформаций конструкций, предполагающихся при планируемом завершении строительства. Методика позволяет наглядно представить резервы несущей способности отдельных конструкций по деформациям, акцентируя внимание исследователя на наиболее конструктивно опасных из них, что способствует принятию рациональных технических решений по возобновлению строительства и необходимому усилению конструкций. Предложенный авторами алгоритм прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций здания на стадии эксплуатации базируется на сравнительной оценке инструментально определенных фактических и расчетных деформаций конструкций в актуальном на момент производства экспертизы и проектном состоянии, полученных общепринятыми методами структурного анализа, что содержит существенный прикладной потенциал и определяет широкий спектр применения методических положений работы в практике строительных экспертиз.

Ключевые слова: жилищное строительство, объект незавершенного строительства, строительно-техническая экспертиза, обследование зданий, техническое состояние конструкций, методика прогнозирования деформаций.

Непрекращающиеся случаи массового обмана дольщиков недобросовестными застройщиками стали поводом ужесточения законодательства в сфере долевого строительства в Российской Федерации. С июля 2018 года в РФ вступили в силу поправки в ФЗ № 214 об участии в долевом строительстве, обязывающие застройщика совершать сделки с дольщиками только в сопровождении уполномоченного банка, который на протяжении всего строительства будет контролировать расходы по счету. С июля 2019 года планируется ввести в обязательном порядке эскроу-счета для застройщика, работающего по долевой схеме строительства, при этом деньги покупателей жилых площадей будут храниться на счету уполномоченного банка и станут доступны застройщику только после ввода дома в эксплуатацию. Это позволит застраховать покупателей от неприятных инцидентов с их деньгами, а застройщику гарантировать выкуп, построенных им площадей. Таким образом, после введения данных изменений в законодательство в России

будут отменены все действующие на данный момент схемы с привлечением денег населения для строительства жилья.

Однако, эти нововведения можно назвать «работой на опережение», то есть для предупреждения дальнейших обманов дольщиков, в то время как на сегодня, по состоянию на июль 2018 года, в реестре министерства строительства и ЖКХ РФ по договорам долевого участия в строительстве числится свыше 800 объектов незавершенного строительства. По информации департамента строительства и транспорта Белгородской области, в нашем регионе в последние годы зафиксировано около 4 масштабных случаев, связанных с обманами дольщиков, в результате чего в области «появилось» несколько «замороженных» строек – крупных недостроенных и частично заброшенных объектов незавершенного строительства. Дальнейшие действия с «замороженными» стройками могут развиваться по двум основным сценариям — достройка либо ликвидация объекта незавершенного строительства [1]. Для обоснованного принятия решения о судьбе

таких объектов необходимо получение экспертного заключения строительно-технической экспертизы. Возобновление строительно-монтажных работ на таких объектах, достройка и завершение их строительством под руководством уже другого заказчика, и как результат – восстановление прав пострадавших дольщиков, возможно только по результатам экспертной оценки технического состояния конструкций и здания в целом в ходе проведения строительно-технической экспертизы (СТЭ) [2, 6, 8].

Основной целью визуального и инструментального обследования строительных конструкций объекта незавершенного строительства в составе строительно-технической экспертизы объектов незавершенного является определение фактических дефектов и деформаций конструкции, поскольку именно эти обстоятельства оказывают первоочередное влияние на достоверность результатов СТЭ. Недостаточно эффективная консервация или отсутствие консервации вообще – вот основные причины дефектов и деформаций строительных конструкций объекта незавершенного строительства. Зачастую обанкротившийся застройщик оставляет объект, даже не демонтировав строительную технику (монтажные краны, грузоподъемники и прочие строительные машины и механизмы), то есть практически бежит со строительной площадки, в связи с чем говорить при этом о какой-либо консервации объекта не приходится вовсе. Еще одним серьезным препятствием проведению СТЭ может явиться частичное или полное отсутствие проектно-сметной документации на объект, случае чего трудоемкость СТЭ возрастает многократно. Характерной чертой большинства незавершенных строительных объектов является поэтажная неоднородность завершенности. Так, на первых этажах жилье уже готово под самоотделку — выпол-

нены внутренние планировочные, окончены черновые отделочные работы, завершено наружное фасадное ограждение, тогда как на последних этажах вполне может быть собранная и частично обетонированная опалубка. Объем инструментальных измерений и количество учитываемых экспертизой факторов действительного состояния конструкций в этом случае весьма велики [2, 10, 11].

Принимая во внимания все вышесказанные обстоятельства, экспертом проводится отдельный дифференцированный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и деформаций строительных конструкций, проводимый в составе СТЭ незавершенных строительством объектов с учетом фактической поэтажной ситуации и актуальных физико-механических свойств материалов [3, 6, 8, 12]. Целью такого анализа является прогнозная оценка развития НДС и деформаций конструкций в предположении возможного проектного завершения объекта строительством и необходимости его безопасной эксплуатации. В этой связи исследования и практика применения методик построения обоснованных оценок предполагаемого (прогнозного) технического состояния конструкций по наблюдаемому текущему имеют существенный исследовательский потенциал.

Методические положения и опыт применения авторской методики построения обоснованных оценок предполагаемого (прогнозного) технического состояния конструкций по наблюдаемому текущему рассмотрим на примере исследования напряженно-деформированного состояния основных несущих конструкций незавершенного строительством многоэтажного жилого дома, расположенного в Белгородской области, подлежащего СТЭ с целью определения возможности завершения объекта строительством (рис. 1–2).



Рис. 1. Внешний вид незавершенного строительством многоэтажного жилого дома

Теоретические параметры текущего напряженно-деформированного состояния конструкций обследованного каркаса на основании полевых данных о прочности и деформативности бетона, фактическом армировании и нагрузках на

конструкции, определялись статическим поперечным расчетом каркаса в конечноэлементном программном комплексе [4, 15].

В соответствии с результатами визуального осмотра и инструментальных измерений пространственного положения и габаритных размеров конструкций [9] экспертами была установлена следующая степень соответствия фактически выполненных конструкций с предусмотренными проектом:

– плиты перекрытия: осевые размеры соответствуют Проекту, фактическая высота перекрытия составляет 200–220 мм, что меньше предусмотренного проектом;

– колонны, стены: осевые размеры и фактические габариты поперечных сечений конструкций соответствуют проекту;

– контурные железобетонные монолитные балки перекрытий, предусмотренные проектом по периметру плит перекрытий, начиная с отм. +12,220 отсутствуют.

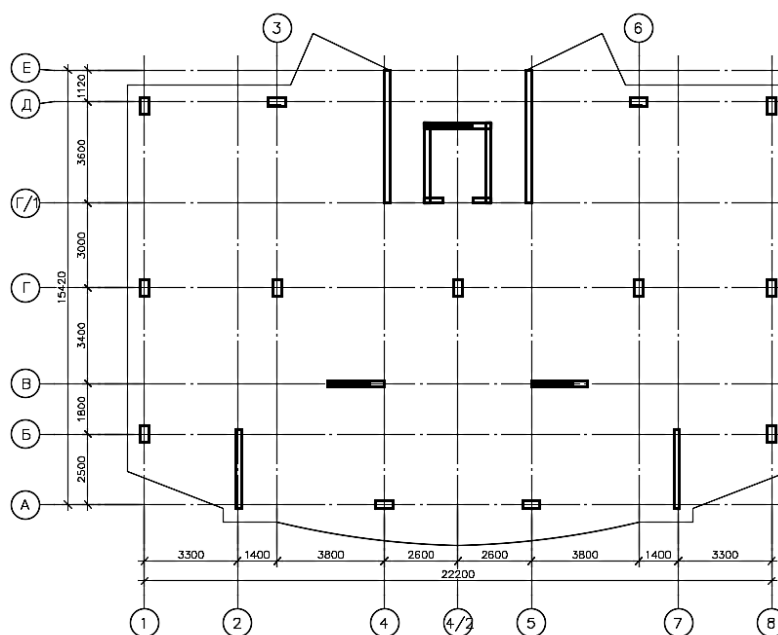


Рис. 2. План типового этажа многоэтажного жилого дома

Принятые прочностные свойства бетона конструкций определены в соответствии с результатами испытания железобетонных кернов, извлеченных из обследованного перекрытия по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» и выборочным исследованием конструкций магнитно-индукционным методом по ГОСТ 22904-93 измерителем глубины залегания арматуры. Установлено, что фактическая кубиковая прочность бетона соответствует классу В25, расчетные параметры армирования, в целом, за исключением основного армирования нижней зоны перекрытий, соответствует проекту.

Нормативные и расчетные значения нагрузок, действующих на межэтажное перекрытие на момент проведения обследования и принимаемые в расчет, следующие: собственный вес перекрытия и вертикальных конструкций каркаса; нагрузка от наружного стенового ограждения в проектном составе по периметру перекрытия; нагрузка от перегородок, принимаемая как равномерно распределенная по перекрытию; нагрузка от покрытия пола; полезная нагрузка, равномерно распределенная по перекрытию, для

квартир жилых зданий; ветровая нагрузка на диски перекрытия, передающаяся от наружных стен [5].

Завершенность строительства и полнота воздействия предусмотренной проектом нагрузки на перекрытия этажей здания приняты на основании визуального осмотра и представлены в табл. 1.

Поверочным расчетом установлены расчетные прогибы плит перекрытия:

– при полной нормативной нагрузке, соответствующей стадии эксплуатации здания;

– при нормативной нагрузке от собственного веса, наружных стен, внутренних перегородок и ветровой нагрузке, соответствующей текущей завершенности строительством 1-5-го этажей здания;

– при нормативной нагрузке от собственного веса конструкций каркаса и внутренних перегородок, соответствующей текущей завершенности строительством 6-9-го этажей здания;

– при нормативной нагрузке от собственного веса конструкций каркаса, соответствующей текущей завершенности строительством технического этажа здания.

Таблица 1

Завершенность строительством

Этаж	Завершенность строительством		
	ж/б каркас	наружные стены	внутренние перегородки
1	есть	есть	есть
2	есть	есть	есть
3	есть	есть	есть
4	есть	есть	есть
5	есть	есть	есть
6	есть	нет	есть
7	есть	нет	есть
8	есть	нет	есть
9	есть	нет	есть
10	есть	нет	нет

Предельно допустимые прогибы плит перекрытия составляют $1/200$ расчетного пролета плиты (п. 2 табл. Е.1 СП 20.13330.2016), определяемого для плит небалочной расчетной схемы как расстояние между опорами в свету. Предельные прогибы перекрытий исходя из физиологических требований, определяемые согласно п. Е.2.2 СП 20.13330.2016 составляют величину, во всех случаях большую $1/200$ пролета. Таким образом, предельно допустимым прогибом плит перекрытия от полной нормативной нагрузки, соответствующей стадии эксплуатации здания, считается $1/200$ соответствующего пролета в свету.

Установленные расчетом прогибы плит перекрытия, соответствующие нормативным нагрузкам, действующим на текущей стадии завершенности объекта строительством, экспертом сравнивались с:

- текущими фактическими прогибами – прогибами перекрытия, полученными инструментальными измерениями на объекте исследования в текущей стадии завершения строительством;

- расчетными прогибами на стадии эксплуатации – прогибами перекрытия, полученными расчетом на нормативные значения полных нагрузок, действующих согласно Проекту, соответствующих стадии эксплуатации завершенного строительством здания;

- прогнозными прогибами на стадии эксплуатации — предположительными прогибами перекрытий при возможном завершении объекта строительством, учитывающими текущий прогиб, текущую стадию завершения этажа строительством и прогнозный коэффициент увеличения прогибов k , определенный как отношение расчетного прогиба в указанных осях на стадии эксплуатации к расчетному прогибу в текущей стадии завершения строительством;

- допустимыми прогибами на стадии эксплуатации (максимальными) – $1/200$ пролета перекрытия в свету в указанных осях.

Максимальные расчетные прогибы в плитах перекрытия на стадии эксплуатации при завершении объекта строительством в текущих конструктивных решениях составили: перекрытие 1-го этажа – до 15 мм; 2-го – до 19 мм; 3-го – до 21 мм; 4-го – до 24 мм; 5-го – до 29 мм; 6-го – до 31 мм, 7-го – до 33 мм; 8-9-го – до 34 мм (табл. 2).

Прогнозные прогибы в плитах перекрытия на стадии эксплуатации по осям отдельным Г/1, А, 1, 2, 7, 8, 4, 5 при завершении объекта строительством в текущих конструктивных решениях, с учетом фактического состояния конструкций, составили до 37 мм, при прогнозном коэффициенте увеличения прогибов k до 2,0 раз.

Фрагмент ведомости предельно допустимых прогибов на стадии эксплуатации, соответствующие пролетам перекрытия в свету в отдельных осях, демонстрирующий методику документирования информации, приведен в табл. 2.

Распределение коэффициента k (рис. 3) по обследованным конструкциям достаточно убедительно демонстрирует масштабный фактор деформаций конструкций для текущей для сложившейся поэтажной завершенности и предполагаемой нагрузки по завершении объекта строительством. Большая часть конструкций (более 80 %) находится в условиях существенного недогруза предельной расчетной нагрузкой (60–80 %), в связи с чем выявление на данной стадии завершенности деформаций, близких, а тем более превышающих предельно допустимые в соответствии с прил. Е СП 20.13330.2017, однозначно свидетельствует о невозможности нормальной эксплуатации такой конструкции по завершению объекта строительством и требует безусловной разработки мероприятий по ее усилению.

Исходя из результатов поверочного расчета плит перекрытий и анализа сводной таблицы 2 было установлено наличие отдельных фрагментов перекрытий, в которых прогнозные значения прогибов превышают предельно допустимые,

что говорит о том, что требуемая трещиностойкость плит перекрытия после завершения строительства на стадии эксплуатации здания не может быть обеспечена. Фактически установленные прогибы плит перекрытия в текущей стадии завершенности строительством исследуемого каркаса в отдельных случаях превышают расчетные на соответствующей стадии, но во всех случаях меньше допустимых прогибов для стадии эксплуатации плит при полной проектной нагрузке [3]. В текущей стадии завершенности строительством плиты перекрытия обследованного здания имеют достаточную по отношению к минимально допустимой жесткость. Прогнозные значения возможного прогиба плит на стадии эксплуатации при завершении объекта строительством согласно проекту, определенные по результатам сравнения расчетных и фактических прогибов на текущей стадии завершенности, для отдельных фрагментов плит превышают предельно допустимые. По завершению строительством плиты перекрытия обследованного здания

без усиления не будут иметь достаточную по отношению к минимально допустимой жесткость. Фактическое армирование плит перекрытия при установленном обследовании классе бетона не соответствует расчетному армированию из условий допустимой ширины раскрытия трещин [5]. По завершению строительством плиты перекрытия обследованного здания без усиления не будут иметь достаточную по отношению к минимально допустимой трещиностойкость (сопротивлению образованию и раскрытию трещин). Плиты перекрытия обследованного здания на отм. свыше +12,220 не могут эксплуатироваться по назначению после завершения объекта строительством согласно проекту без дополнительного усиления. На основании представленных результатов исследования было рекомендовано выполнить усилению плит перекрытия, необходимое для завершения объекта строительством и сдачи в эксплуатацию, стальными контурными балками, располагаемыми по осям предусмотренных проектом, но отсутствующих выше отм. +12,220 фактически монолитных железобетонных.

Таблица 2

**Установленные инструментальными измерениями максимальные фактические прогибы
перекрытий отдельной секции**

Этаж	Текущий фактический прогиб, мм	Расчетный прогиб в текущей стадии завершенности этажа строительством, мм	Расчетный прогиб на стадии эксплуатации, мм	Прогнозный прогиб на стадии эксплуатации, мм	Допустимый прогиб на стадии эксплуатации (максимальный), мм
2	6	3	4	8 (k=1.33)	23
	19	4	6	29 (k=1.50)	29
	...				
3	4	3	4	5 (k=1.33)	23
	3	5	7	4 (k=1.40)	29
	...				
4	4	4	5	5 (k=1.25)	23
	9	6	8	12 (k=1.33)	29
	...				
7	0	5	9	0 (k=1.80)	23
	5	6	9	8 (k=1.50)	29
	...				

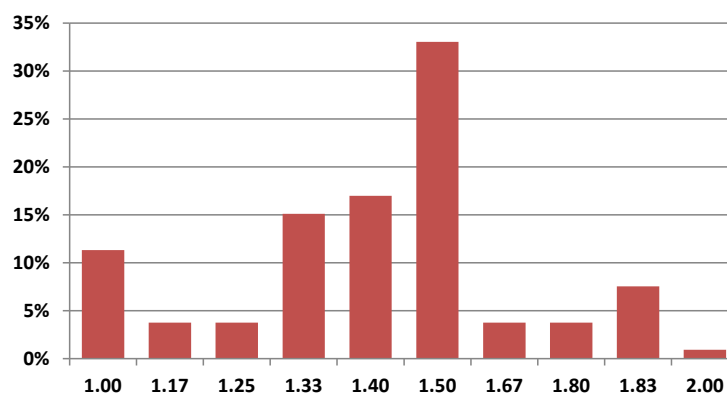


Рис. 3. Частота распределения коэффициента k по обследованным конструкциям

Представленная авторская методика прогнозирования деформаций конструкций обследуемого в составе СТЭ объекта незавершенного строительства позволила на основании проведенных полевых исследований материала и фактической поэтажной завершенности здания не только получить быструю и показательную оценку возможности завершения объекта строительством, но и сфокусировать внимание участников строительного проекта на наиболее проблемных конструкциях, нуждающихся в приоритетном техническом мониторинге в процессе завершения строительством и эксплуатации объекта [4, 10, 14]. Методика позволяет объединить традиционные подходы к структурному анализу объектов строительно-технической экспертизы на этапе проектирования и методы полевой диагностики фактического состояния конструкций, с целью определения наиболее вероятного технического состояния конструкций при реализации жизненного цикла здания, достоверно оценить экономическую целесообразность завершения работ на объекте, осуществлять экспертную работу при редевелопменте возвращаемой в муниципальный фонд недвижимости любого масштаба плановых инвестиций и степени незавершенности, используя единообразные организационно-технологические подходы к производству строительно-технических экспертиз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белых Т.В., Давиденко П.В., Жариков И.С. Проблемы методологического аппарата проведения судебной строительно-технической экспертизы // В сборнике: Молодежь и XXI век – 2018 материалы VIII Международной молодежной научной конференции: в 5 томах. 2018. С. 249–252.
2. Наумов А.Е., Абакумов Р.Г., Давиденко П.В. Непосредственная и опосредованная методология проведения судебной строительно-технической экспертизы, проблемы и эффективность применения // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 2 (20) С. 60–65.
3. Жариков И.С., Давиденко П.В. Эффективное использование BIM-технологий при проведении строительно-технических экспертиз // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №1. С. 42–49.
4. Жариков И.С., Давиденко П.В., Кладиев Н.Н. К вопросу о BIM-проектировании // В сборнике: 2-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России». 2017. С. 126–129.
5. Давиденко П.В. Проблемы и эффективность применения методологии проведения судебной строительно-технической экспертизы // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова 2017. С. 946–951.
6. Нейман К.И., Абакумов Р.Г., Наумов А.Е. Теоретические и практические аспекты строительного мониторинга при постреконструкционной эксплуатации // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 4 (22). С. 167–170.
7. Субботин И.А., Субботин В.А., Субботин А.И. Применение современных приборов неразрушающего метода контроля при обследовании строительных конструкций // В сборнике: Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах. Сборник научных статей по материалам 16-ой Международной научно-практической конференции: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. 2016. С. 91–95.
8. Рябова А.С. Стандартизация в области обследования и испытания строительных конструкций // В сборнике: Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры. Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2018. С. 1010–1012.
9. Наумов А.Е., Тупикина О.Н. Опыт использования геодезических инструментов при экспертизе строительных конструкций // В сборнике: Современные технологии в строительстве, теплоснабжении и энергообеспечении. Материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО "Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова", кафедра "Строительство и теплогазоснабжение". 2015. С. 158–162.
10. Braila N.V., Khazieva K.L., Staritsyna A.A. Results of technical inspection monitoring of the operation object. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. Pp. 70–77.
11. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Stress-strain state of precast and cast-in place buildings. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. Pp. 175–184.
12. Ribeiro R.R.J., Diogenes, H.J.F., Nobrega, M.V., Debs A.L.H. C. El. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2016, Vol. 9, No.5. Pp. 722–744.
13. Abdulsamee H. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil,

Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18) Budapest, Hungary – April 8-10, 2018.

14. Sneideris A., Marciukaitis G. Strain-stress analysis of reinforced concrete beams strengthened without unloading by exterior reinforcement. Application of Codes, Design and Regulations. January 2005. Pp. 685–692.

15. Wellison J. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017.

Поступила в марте 2019 г.

© Давиденко П.В., Кладиев Н.Н., Наумов А.Е., Жариков И.С., Ерижокова Е.С., 2019

Информация об авторах

Давиденко Полина Викторовна, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: davidenkopolly@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кладиев Николай Николаевич, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: bestniko@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Наумов Андрей Евгеньевич, заведующий кафедрой экспертизы и управления недвижимостью, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kafeun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жариков Игорь Сергеевич, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: igor_bgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ерижокова Елена Сергеевна, студент. E-mail: sockolowa.le@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, Московская область, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

^{1,*}**Davidenko P.V.**, ¹**Kladiev N.N.**, ¹**Naumov A.E.**, ¹**Zharikov I.S.**, ²**Erizhokova E.S.**

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

²*Moscow State University of Civil Engineering (National Research)
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh. 26*

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

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR ESTIMATING DEFORMATIONS IN STRUCTURES OF UNFINISHED CONSTRUCTIONS AT THE PROCESS OF TECHNICAL EXPERTISE

Abstract. In the production of structures surveys for unfinished buildings, the tasks of studying the current and estimating the final stress-strain condition after completion are being solved. An incomplete object that is in various stages of completeness of its individual fragments has a significant impact on prognostic estimates. The paper presents the author's experience of finite element modeling of the unfinished reinforced concrete frame with regard to its actual element-by-element completion and a practical method for estimating on this basis the values of structural deformations at the stage of completion. The technique allows figuring out the reserves of the structures' bearing capacity by deformations, focusing the researcher's attention on the most constructively dangerous ones. This contributes to adoption of rational technical decisions on the resumption of construction and the necessary structural reinforcement. The proposed algorithm for estimating the stress-strain condition of unfinished structures at the stage after completing is based on a comparative assessment of actual surveyed and calculated deformations of structures, obtained by generally accepted structural analysis methods, which contains wide range of method's applications in the practice of construction expertise.

Keywords: civil structures, unfinished structures, technical expertise in constructions, structures surveys, technical condition of structures, methods for estimating of deformation in structures.

REFERENCES

1. Belykh T.V., Davidenko P. V., Zharikov I. S. Problems of the methodological apparatus of the judicial construction and technical expertise [*Problemy metodologicheskogo apparata provedeniya sudebnoj stroitel'no-tehnicheskoy ekspertizy*]. V sbornike: Molodezh' i XXI vek – 2018 materialy VIII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii: v 5 tomah. 2018. Pp. 249–252. (rus)
2. Naumov A.E., Abakumov R.G., Davidenko P.V. Direct and indirect methodology of judicial construction and technical expertise, problems and efficiency of application [*Neposredstvennaya i oposredovannaya metodologiya provedeniya sudebnoj stroitel'no-tehnicheskoy ehkspertizy, problemy i ehffektivnost' primeneniya*]. Innovative economy: prospects of development and improvement. 2017. No. 2 (20). Pp. 60–65. (rus)
3. Zharikov I.S., Davidenko P.V. Effective use of BIM-technologies during construction and technical expertise [*Effektivnoe ispol'zovanie BIM-tehnologij pri provedenii stroitel'no-tehnicheskikh ehkspertiz*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 1. Pp. 42–49. (rus)
4. Zharikov I.S., Davidenko P.V., Kladiev N.N. On the issue of BIM-design [*K voprosu o BIM-proektirovanii*]. V sbornike: 2-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya perspektivnyh razrabotok molodyh uchenykh «Nauka molodyh – budushchee Rossii». 2017. Pp. 126–129. (rus)
5. Davidenko P.V. Problems and efficiency of application of methodology of judicial construction and technical expertise [*Problemy i ehffektivnost' primeneniya metodologii provedeniya sudebnoj stroitel'no-tehnicheskoy ehkspertizy*]. V sbornike: Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodyh uchenykh BGTU im. V.G. SHuhova 2017. Pp. 946–951. (rus)
6. Neyman K.I., Abakumov R.G., Naumov A.E. Theoretical and practical aspects of construction monitoring during it post-reconstruction exploitation [*Teoreticheskie i prakticheskie aspekty stroitel'nogo monitoringa pri postrekonstrukcionnoj ehkspluatatsii*]. Innovative economy: prospects of development and improvement. 2017. No. 4 (22). Pp. 167–170. (rus)
7. Subbotin I.A., Subbotin V.A., Subbotin A.I. Application of modern devices of non-destructive methods of control during the inspection of building construction [*Primenenie sovremennykh priborov nerazrushayushchego metoda kontrolya pri obsledovanii stroitel'nykh konstrukcij*]. V sbornike: Komp'yuternye tekhnologii v nauke, proizvodstve, social'nykh i ekonomicheskikh processakh. Cbornik nauchnykh statej po materialam 16-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: YUzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politehnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova. Pp. 91–95. (rus)
8. Ryabova A.S. Standardization in the field of inspection and testing of building structures [*Standartizaciya v oblasti obsledovaniya i ispytaniya stroitel'nykh konstrukcij*]. V sbornike: Dni studentcheskoj nauki. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov instituta stroitel'stva i arhitektury. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet. 2018. Pp. 1010–1012. (rus)
9. Naumov A.E., Tupikina O.N. Experience of using surveying equipment in the expertise of building structures [*Opyt ispol'zovaniya geodezicheskikh instrumentov pri ehkspertize stroitel'nykh konstrukcij*]. V sbornike: Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve, teplosnabzhenii i energoobespechenii. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBOU VO "Saratovskij GAU im. N.I. Vavilova", kafedra "Stroitel'stvo i teplogazosnabzhenie". 2015. Pp. 158–162. (rus)
10. Braila N.V., Khazieva K.L., Staritsyna A.A. Results of technical inspection monitoring of the operation object. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. Pp. 70–77.
11. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Stress-strain state of precast and cast-in place buildings. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. Pp. 175–184.
12. Ribeiro R.R.J., Diogenes H.J.F., Nobrega, M.V., Debs A.L.H.C.El. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 2016. Vol. 9. No. 5. Pp. 722–744.
13. Abdulsamee, H. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18) Budapest, Hungary – April 8-10, 2018.
14. Sneideris A., Marciukaitis G. Strain-stress analysis of reinforced concrete beams strengthened without unloading by exterior reinforcement. Application of Codes, Design and Regulations. January 2005. Pp. 685–692.
15. Wellison J. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017.

Information about the authors

Davidenko, Polina V. Master student. E-mail: davidenkopolly@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kladiev, Nikolai N. Master student. E-mail: bestniko@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Naumov, Andrey E. PhD, Assistant professor. E-mail: kafeun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zharikov, Igor S. Senior lecturer. E-mail: igor_bgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Erizhokova, Elena S. Bachelor student. E-mail: sockolowa.le@yandex.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Received in March 2019

Для цитирования:

Давиденко П.В., Кладиев Н.Н., Наумов А.Е., Жариков И.С., Ерижокова Е.С. Совершенствование методики прогнозирования деформаций строительных конструкций объектов незавершенного строительства при проведении строительно-технических экспертиз // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 90–98. DOI: 10.34031/article_5ce292c50f67f9.02927539

For citation:

Davidenko P.V., Kladiev N.N, Naumov A.E., Zharikov I.S., Erizhokova E.S. Improvement of the method for estimating deformations in structures of unfinished constructions at the process of technical expertise. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 90–98. DOI: 10.34031/article_5ce292c50f67f9.02927539

DOI: 10.34031/article_5cd6df471c80b0.92422061

^{1,*}Князева Н.В., ¹Лёвина Д.А.¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

*E-mail: nknyazeva@mgsu.ru, levinadaraleks@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-СЦЕНАРИЕВ В РАБОТЕ СЛУЖБ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Отсутствие единой информационной модели является причиной затруднённого взаимодействия всех участников полного цикла строительства. Особенности трудности при этом имеют службы эксплуатации, которые не получают актуальную и полную информацию об объекте. Поэтому в текущее время ведётся интенсивное внедрение информационного моделирования (ИМ) для эксплуатирующих служб. Разрабатываются нормативные документы, учитывающие зарубежный опыт и российскую своеобразность в области проектирования. Имеется необходимость распространить использование ИМ за стадии проектирования и строительства. Первенствующими поводами являются: гарантия качественного контроля, гарантия безопасного функционирования объекта, гарантия переоснащения здания новым инженерным оборудованием, гарантия планирования и управления зданием, документооборотом и т.д. Для организации решения актуальных проблем и для обеспечения максимально полезными свойствами и функциями служб эксплуатации, продемонстрируем использование недостаточно известных BIM-сценариев. При их связи с иными разработанными инструментами информационного моделирования производятся результаты, которые естественно требуют доработок, изменений, но имеют перспективные следствия для будущего. Для проведения анализа этих следствий и совершения выводов в данной статье продемонстрированы одни из ключевых моментов, способствующих интеграции ИМ с эксплуатирующими службами.

Ключевые слова: информационное моделирование, информационные системы, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, BIM-сценарий, автоматизированное проектирование, системы управления.

Введение. Продолжают своё развитие современные технологии информационного моделирования (BIM), как в проектных организациях, так и в государственном регулировании. Появляются новые успешные результаты при использовании BIM. Данное применение позволяет совершать быстрые и эффективные решения на всех стадиях жизненного цикла объекта (ЖЦО) – от концепции до эксплуатации. Данные технологии могут позволить объединять информацию для каждого ЖЦО и обмениваться данными между предприятиями. Однако, всё ещё недостаточно изученной является интероперабельность строительных и проектных технологий информационного моделирования с системами эксплуатации здания в целом. BIM-модель (информационная модель) необходима на стадии эксплуатации здания для обеспечения показателей функцией прозрачности и для улучшения скорости реагирования, так как бумажное управление не позволяет совершать это быстро. Стоит исследовать текущие проблемы интеграции информационных систем со службами эксплуатации и управления.

Для успешного внедрения BIM организация должна иметь представление об основных ключевых компонентах, о том, чего желает она добиться при интеграции BIM на стадии эксплуатации и обладать полным представлением окончательного результата.

Изучение существующей в этой отрасли литературы показал, что авторы гласят о недостаточном понимании технологий, об отсутствии единых принятых стандартов и методик для служб эксплуатации зданий [1, 2]. BIM (информационное моделирование зданий) – это не новая платформа, а технология, вносящая изменения в подход проектирования. При этом необходима чёткая координация. В.В Шарманов в своей работе [2] пишет о малой заинтересованности нашего государства в применении технологии. Также он называет ещё одну из причин – медленное внедрение BIM программ в учебные заведения. Технологии развиваются, время быстрыми темпами идёт, как результат мы наблюдаем разрыв между образованием и настоящим временем.

Теперь следует отметить недостаточно изученный элемент информационного моделирования – BIM-сценарий или BIM-use. BIM-сценарии декомпозируют на отдельные фазы разработку проекта в рамках информационной модели. Применяются для конкретных целей инвестиционно-девелоперского проекта (ИДП). При отсутствии взаимосвязи между BIM-сценариями в пределах единого ИДП нарушаются технологические процессы, теряется производительность, часть работ выполняется напрасно. По утверждению автора [3] отсутствие связей объясняется недостаточной изученностью многообразия BIM-сценариев и неопределённостью границ этого многообразия. По заключению И. Емельянова [4], применение

всех BIM-сценариев предполагает высокую сложность проекта с большим объемом данных и естественно подобные системы нуждаются в классификации (Классификатор, MDS) и управлении (BER, Управление Данными).

Для достижения благоприятного результата, а именно для быстрого принятия решения и управления при эксплуатации объектами нам требуется качественная интеграция BIM проекта с информационными системами, которые применяются организациями. Необходимо отметить, что для передачи данных, для обмена информацией между участниками всего цикла строительства требуется общая среда взаимодействия. В Великобритании был создан известный сейчас в мире стандарт в сфере информационного моделирования BS 1192:200 [5]. В нём был образован термин CDE (Common Data Environment). CDE является первенствующим источником проверенных надежных данных для всех участников BIM-моделирования [5].

Следующий важный компонент – классификаторы, то есть спецификация разработки моделей. В BIM генеральную роль играют библиотечные элементы, которые компонуют целый объект. Эти отдельные элементы могут содержать в себе информацию, которая может понадобиться на следующих этап разработки проекта. Например, стоимость детали, которая не важна для проектировщиков, но важна для сметчика. В настоящее время в России нету одной принятой системы классификации, поэтому некоторые предприятия вынуждены использовать зарубежные, переписывать их под себя [6].

Особенно можно отметить такие разработки:

- Omniclass – система классификации, разработанная в США для строительной отрасли.
- Uniclass – система классификации разработанная в ВБ для той же сферы.
- COBie (Construction-Operation Building information exchange)-формат для передачи данных, разработанный в США для организации BIM-обмена данными и в настоящее время всё еще совершенствуется специалистами.

Для российского использования системы Omniclass и UniClass не подходят, так как, например, код Omniclass в Revit за рубежом обозначает код материала [7]. В то время как наша система должна иметь отношение к ГЭСН, ФЕР, то есть иметь привязку к технологиям строительного производства.

При удачном, грамотном использовании всех перечисленных важных компонентов, мы получаем качественную интеграцию BIM проекта с информационными системами. Модель удовлетворяет и EIR (требования заказчика), так

и требованиям BIM-сценариев [4]. За тем хотелось бы отметить следующие системы – системы управления документооборотом, BMS (системы управления зданиями), системы управления энергоресурсами и т.д. Часто предприятия не используют автоматизированные информационные системы и отдают предпочтению человеческому труду. Krystyna Araszkiewicz в своей статье [8] пишет о главных преимуществах, связанных с использованием информации и данных, включенных в модель функционирования здания BIM. Перевод потока информации из модели BIM в систему Facility Management (FM) более эффективен, чем ручной ввод данных, который существует в практике FM. Это возможно при условии уже интегрированной системы.

Методика. Предметом исследования является – эффективность использования BIM-сценариев на стадиях по эксплуатации объектов и эффективность использования информационных систем.

Целью является – изучение возможности интеграции информационной модели с информационными системами служб эксплуатации с применением BIM-сценариев.

Основная часть. Для реализации поставленной цели нам требуется система управления FM-CAFM (Computer Aided Facility Management). Для взаимодействия с CAFM необходимо скомпилировать данные из системы классификации Omniclass (Omniclass. Table 33 – Disciplines) по разделам эксплуатации с этапами инвестиционно-девелоперского проекта (табл. 1), которые были выделены авторами, опираясь на отечественную [9] и зарубежную документацию (Omniclass. Table 31 – Phases), результат представлен (табл. 2).

Перед нами могут существовать различные задачи, которые подразумевают различные виды работы с данными: поиск, систематизация, преобразование информации в нужный вид, фактическое использование сформированных сведений, выбор в каком формате будут они храниться. Итак, для реализации данных нам не хватает проклассифицировать BIM-сценарии для исследуемых стадий, как это сделал автор [11].

01. Сбор информации
02. Формирование информации
03. Анализ информации
04. Обмен информацией
05. Воплощение информации

Каждая категория имеет свою подкатегорию вида взаимодействия с информацией, как заявлено в работе [10].

Сформируем пример комплекта BIM-сценариев, как предлагает Н.В. Князева [11].

Наши этапы не предполагают выпуск такой документации, как генеральный план, архитектурные решения и т.д., поэтому мы будем использовать дисциплины из Omniclass. В качестве примера

возьмем инвестиционно-девелоперский проект для служб эксплуатации выставочного центра (ВЦ) (табл. 3).

Таблица 1

Перечень дисциплин инвестиционно-девелоперского проекта для ввода в эксплуатацию и эксплуатации здания

Дисциплина	Шифр Omniclass	Описание
Quality Assurance (QA)	33-25 51 00	Надзор, координация всех процессов планирования, реализации и надзор за планом контроля качества проекта. Может также включать работу с сотрудниками, агентствами, участвующих в инспекции и испытаниях.
Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Operation and Maintenance (HVA)	33-55 24 21 17	Работы по техническому обслуживанию и эксплуатации, которые связаны с отоплением, вентиляцией, кондиционированием и другими сервисами.
Proposal Preparation (PP)	33-25 14 00	Согласование контрактов, договоров, положений, управление частными и государственными фондами и контрактами, отслеживание предложений, написание предложений и другой документации. Также может включаться: соблюдение текущих предложений согласно инструкциям, управление производством и распределение всего документооборота.
Facility Use Disciplines	33-55 00 00	Продолжение технического обслуживания и использования здания, сооружения или участка после завершения строительства.
Real Estate (RE)	33-55 14 00	Покупка, продажа или аренда недвижимости
Facility Owner (ROw)	33-55 21 00	Владение собственностью и снижение всех расходов, связанных со всеми аспектами закупок, проектирования, строительства, и использования объекта.
Facility Operations (FOp)	33-55 24 00	Предоставление вспомогательных обслуживающих услуг в пределах объекта (уборка, обслуживание, охрана и безопасность и др.)
Facility Restoration Services (FRS)	33-55 36 00	Поддержание и ремонт поврежденных частей здания из-за срока службы, погоды или износа материала.

Таблица 2

Этапы инвестиционно-девелоперского проекта для эксплуатации здания

Этап	Шифр	Описание
Ввод в эксплуатацию	09	Оценка завершённой работы посредством тестирования, инспекции и ввода в эксплуатацию (в том числе всего оборудования) для обеспечения соответствия критериев проектирования, эффективности в соответствии с применяемыми нормами и стандартами. Передача исполнительной документации от команды проектировщиков и строителей группе управления пользователем объекта, а также демонстрации, обучение и инструкции.
Эксплуатация	10	На этом этапе пользователь или арендатор занимает полезную площадь, управляет системами объекта, использует и обслуживает его, в т. ч. проводит ремонтные работы.

Каждый BIM-сценарий является составляющей технологией ИМ. В данной таблице представлены возможные способы интеграции программных комплексов и иных инструментов с информационной моделью здания. Для служб эксплуатации ВЦ требуется высокое внимание к технической безопасности здания и к его мониторингу в целом.

В сценарии 09-03-03-HVA сравнение обмерных работ возможно благодаря импорту данных в форматах ASCII, DXF, а также в специально

разработанном формате передачи данных между Cyclone и AutoCAD (Autodesk Corp., США) или MicroStation (Bentley Systems, Inc., США). Также имеется возможность конвертирования в форматы, совместимые с САПР.

Интеграция, как в сценарии 09-03-03-QA с помощью экспорта данных в формате cvs, даёт возможность просмотра теплопотерь на информационной модели ВЦ путём извлечения данных из таблиц о проблемных зонах на внутренних фасадах, так и на внутренней части объекта.

Таблица 3

ВМ-сценарии этапа эксплуатации и ввода в эксплуатацию на примере выставочного центра (ВЦ)

Шифр	Описание	Инструмент	Интеграция с информационной моделью
09-03-03-HVA	Обмерные работы и сопоставление с информационной моделью ВЦ	Лазерный сканер FARO Focus S150; 3D сканер Leica ScanStation C10	Интеграция посредством программного комплекса CYCLONE и его встроенного модуля Model
09-03-03-QA	Проверка объекта ВЦ на теплопотери и внесение данных в информационную модель	Тепловизор	Для интеграции использование ПО FLIR QuickPlot и FLIR ResearchIR, где возможен экспорт графиков в стандартные форматы (cvs, bmp, jpg)
09-03-03-PP	Согласование документов по отдельным видам работ по информационной модели ВЦ; Привязка разрешительной документации	Bentley ProjectWise	Интеграция посредством SQL-запросов на основе XML-документов
10-01-01-RE	Внесение информации в базу данных по арендуемым и купленным площадям	MS Excel MS Access «Баз.Ар.»	SQL-запрос в информационную модель Revit по помещениям (по необходимым характеристикам типа площадь, освещенности и т.д.), передача сформированной базы в формате XML-документа или предоставление доступа к проекту с помощью API-драйвера или ODBC
10-01-03-FOW	Проверка расхода в системах водопотребления для выставления счетов арендаторам	Первичные датчики; вычислители, устройств сбора и передачи данных; сервер АСУВ	Метод хранения данных ETL. Извлечение исходной информации из базы и преобразование через необходимый формат в целевое хранилище
10-05-03-FRS	Ведение учета техники для реконструкции и ремонта	1С КОРУСконсалтинг	Интеграция с 1С на основе ESB; Электронный документооборот возможно локально с использованием оборудования заказчика, в облаке с помощью Microsoft Azure, или в облаке с помощью Microsoft Office 365
10-05-04-FOP	Мониторинг системы охранной безопасности	ПО «Интеллект»	Комплекс может интегрироваться с другими системами за счет открытой архитектуры. Конфигурирование, управление и мониторинг систем осуществляется как из централизованного пункта, так и с удаленных рабочих мест
10-05-04-FRS	Мониторинг за техническим состоянием строительных конструкций	ZETlab	Извлечение информации с помощью формата IFC и помещение в формат COBie

Дисциплина «Проверка расхода в системах водопотребления для выставления счетов арендаторам» использует метод хранения данных ETL. Для многих ETL-решений нужны личные серверы, способы обработки, базы данных и лицензии.

Чтобы извлекать нужные данные, используем формат COBie. COBie помогает собирать данные, такие как список применяемого оборудования, данные о мониторинге здания и т.д. Это даёт возможность применить его для служб эксплуатации. Для того, чтобы автоматизировать управление проектом обратимся к системе CAFM (Computer Aided Facility Management). Так

как COBie является открытым стандартом, информационные системы управления активами и средствами управления (CAFM) могут импортировать данные COBie и заполнять поля данных. Это экономит менеджерам достаточно большое количество времени, если сравнивать с ручным вводом и поиском информации [15, 16].

При мониторинге за техническим состоянием строительных конструкций ВЦ обмен информацией идет с помощью её извлечения в формате IFC и помещением ее в COBie. COBie предназначен для хранения и передачи всех существенных данных для этапа эксплуатации. COBie рассматривается как одно из решений, которое

облегчило бы передачу информации из систем информационного моделирования в системы САФМ. Его цель – улучшить способ захвата информации на этапах и обеспечения управления [14]. Авторы статьи [15] рассказывают, что сохранение информации в течение всего жизненного цикла зданий важно для эффективного управления объектами и принятия решений об окончании срока эксплуатации зданий. Преимущество COBie заключается в том, что его можно просматривать не только в нескольких приложениях BIM, но и в простой электронной таблице.

Вывод.

Для организации эффективного взаимодействия ИМ со службами эксплуатации важными составляющими являются:

1. CDE (Common Data Environment) – для обеспечения единой среды взаимодействия.
2. BIM-сценарии для структуризации и взаимодействия.
3. Единый классификатор.
4. COBie- формат для обмена данными.
5. САФМ- для автоматизированной рациональной эксплуатации.

Однако, проанализировав настоящее состояние BIM-сценариев следует сказать, что существует необходимость в разработке рабочей справочной базы.

Также существует необходимость в разработке российского классификатора.

Все данные собранные на протяжении ЖЦО в информационной модели безусловно являются полезными для эксплуатирующих служб. Но для использования этой информации нужна качественная её интеграция с информационными системами.

Основными показателями продуктивности применения информационных систем являются следующие факторы:

1. Снижение стоимости эксплуатации в связи с рациональным планированием ресурсов.
2. Улучшение степени контроля и управления вследствие автоматизации процессов и операций.

Данные, которые накапливаются и хранятся в BIM-модели, трудно обработать в первоначальном виде для интереса эксплуатирующих организаций, в связи с чем разобран вопрос экспорта данных из различных инструментов и аппаратов в модель по соответствующим BIM-сценариям. Такие способы хранения информации влекут за собой удобство перемещения данных из информационной модели в САФМ.

Для каждого BIM-сценария необходимо определить источники эксплуатационных дан-

ных и выполнить проверку полноты данных с помощью COBie формата, с помощью встроенных систем проверки в САФМ.

Основная цель эксплуатационной информационной модели:

1. Документирование процесса эксплуатации здания на цифровом аналоге.
2. Обеспечение полной информацией службы инвестора, заказчика, эксплуатирующие компании.

Совместное применение информационных моделей и САФМ в перспективе дает возможность снизить затраты на эксплуатацию и повысить продуктивность работы служб эксплуатации. Взаимодействие BIM и FM может быть организована за счет единого информационного пространства и урегулированного BIM-сценариями процесса доступа к нему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астафьева Н.С., Кибирева Ю.А., Васильева И.Л. Преимущества использования и трудности внедрения информационного моделирования зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 8 (59). С. 41–62.
2. Шарманов В.В., Мамаев А.Е., Болейко А.Е., Золотова Ю.С. Трудности поэтапного внедрения BIM // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 10 (37). С. 108–120.
3. Кривой С.А., Сёмин А.И., Попов А.В., Бебьякин Б.О. Взаимосвязь BIM-сценариев в рамках инвестиционно-девелоперского проекта // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 2 (65). С. 20–39.
4. Емельянов И. 25 сценариев и другие аспекты многообразия BIM. [Электронный ресурс]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18557 (дата обращения: 15.11.2018)
5. Скворцов А.В., Бойков В.Н. Общая среда данных как ключевой элемент информационного моделирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6
6. Талапов В. Технология BIM: стандарты и классификаторы. [Электронный ресурс]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17474 (дата обращения: 20.12.2018)
7. Пакидов И.И. BIM_tech. [Электронный ресурс]. URL: http://isicad.ru/ru/pdf/Pakidov_BIM_tech.pdf (дата обращения 20.12.2018)
8. Araszkiwicz K. Digital Technologies in Facility Management – The state of Practice and Research Challenges // Procedia Engineering. 2017. Vol. 196. Pp. 1034-1042

9. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Собрание законодательства РФ. 04.01.2010. № 1. С. 5.

10. Ralf G. Krieder, John I. Messner The Uses off BIM. Classifying and Selecting BIM Uses. Version 0.9 September (2013). URL: http://bim.psu.edu/download/the_uses_of_bim.pdf (дата обращения 20.12.2018)

11. Князева Н.В. Информационные системы в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2018. Том 9. С. 68–71.

12. Гришина Н. Эксплуатируй это: о пользе BIM на этапе эксплуатации. [Электронный ресурс]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19458 (дата обращения: 02.11.2018).

13. BIM с позиции эксплуатации объекта: от информационной модели к Facility management URL: [Электронный ресурс]. <http://integral-russia.ru/2017/11/05/bim-s-pozitsii-ekspluatatsii-obekta-ot-informatsionnoj-modeli-k-facility-management/> (дата обращения: 02.11.2018).

14. Vikki Edmondson, Martin Cerny, Michael Lim, Barry Gledson, John Woodward. A smart sewer asset information model to enable an 'Internet of Things' for operational wastewater management // Automation in Construction. 2018. Vol. 91. Pp. 193–205.

15. Akinade O.O., Oyedele L.O., Ajayi S.O., bMuhammad Bilal, Hafiz A. Alaka, Hakeem A. Owolabi, Omolola O. Arawomo // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 180. Pp. 375–385.

Информация об авторах

Князева Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве. E-mail: nknyazeva@mgsu.ru. Московский государственный строительный университет (Национальный Исследовательский). Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Лёвина Дарья Алексеевна, студент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве. E-mail: levinadaraleks@gmail.com. Московский государственный строительный университет (Национальный Исследовательский). Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила в февраль 2019 г.

© Князева Н.В., Лёвина Д.А., 2019

^{1,*}**Knyazeva N.V., ¹Levina D.A.**

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research)
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26

*E-mail: nknyazeva@mgsu.ru, levinadaraleks@gmail.com

USING BIM SCENARIOS IN OPERATION SERVICES

Abstract. The lack of a single information model is the reason for the difficult interaction of all participants in the full cycle of construction. Operational services have particular difficulties: they do not receive up-to-date and complete information about the object. Therefore, intensive implementation of information modeling (IM) for operating services is conducted. Regulatory documents that take into account foreign experience and Russian originality in the field of design are being developed. There is a need to extend the use of IM at the stage of design and construction. The primary reasons are a guarantee of quality control, a guarantee of safe operation of the facility, a guarantee of re-equipment of the building with new engineering equipment, a guarantee of planning and management of the building, workflow, etc. The use of insufficiently known BIM scenarios is demonstrated to organize the solution of actual problems and to provide the most useful properties and functions of exploitation services. In connection with other information modeling tools developed, results are produced that require modifications and changes, but have promising implications for the future. In order to analyze these implications and make conclusions, the article demonstrates one of the key points that facilitate the integration of IM with operating services.

Keywords: information modeling, information systems, commissioning, operation, BIM-scenario, computer-aided design, control systems.

REFERENCES

1. Astafieva A.N., Kibireva J.A., Vasileva I.L. Advantages of use and difficulties of implementing building information modeling [Preimushchestva ispol'zovaniya i trudnosti vnedreniya informacionnogo modelirovaniya zdaniy].

Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No. 8 (59). Pp. 41–62. (rus)

2. Sharmanov V.V., Mamaev A.E., Boleiko A.S., Zolotova J.S. Difficulties in phasing in BIM [Trudnosti poehtapnogo vnedreniya BIM]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. No. 10 (37). Pp. 108–120. (rus)

3. Krivoy S.A., Semin A.I., Popov A.V., Bebyakin B.O. Interrelation of BIM-scenarios in the framework of the investment and development project [*Vzaimosvyaz' BIM-scenariy v ramkah investicionno-developerskogo proekta*]. Construction of unique buildings and structures. 2018. No. 2 (65). Pp. 20–39. (rus)
4. Emelyanov I. 25 scenarios and other aspects of the diversity of BIM [*25 scenariy i drugie aspekty mnogoobraziya BIM*]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18557 (access date 11.15.2018) (rus)
5. Skvortsov A.V., Boykov V.N. Common data environment as a key element of information modeling of highways [*Obshchaya sreda dannykh kak klyuchevoj ehlement informacionnogo modelirovaniya avtomobil'nykh dorog*]. CAD and GIS of highways. 2015. No. 2 (5), DOI: 10.17273 / CADGIS.2015.2.6.2015|. № 2(5), DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6. (rus)
6. Talapov V. BIM technology: standards and classifiers [*Tekhnologiya BIM: standarty i klassifikatory*]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17474 (access date: 12.20.2018). (rus)
7. Pakidov I.I. BIM_tech. [Electronic resource]. URL: http://isicad.ru/ru/pdf/Pakidov_BIM_tech.pdf (access date: 12.20.2018) (rus)
8. Araszkievicz K. Digital Technologies in Facility Management – The state of Practice and Research Challenges. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 196. Pp. 1034–1042.
9. Federal Law dated December 30.12.2009 № 384-FZ Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures [*Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij*]. Collection of Legislation of the Russian Federation. 01.04.2010. № 1. Art. five.
10. Ralf G. Krieder, John I. Messner The Uses off BIM. Classifying and Selecting BIM Uses. Version 0.9 September (2013). URL: http://bim.psu.edu/download/the_uses_of_bim.pdf (access date: 12.20.2018)
11. Knyazeva N.V. Information systems in construction [*Informacionnye sistemy v stroitel'stve*]. Industrial and civil construction. 2018. Vol. 9. Pp. 68–71. (rus)
12. Grishina N. Exploit it: about the benefits of BIM in the operational phase [*Ehkspluatiruj ehto: o pol'ze BIM na ehtape ehkspluatatsii*]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19458 (access date: 02.11.2018). (rus)
13. BIM from the standpoint of operating an object: from the information model to Facility management [*BIM s pozitsii ehkspluatatsii ob'ekta: ot informacionnoj modeli k Facility management*]. URL: <http://integral-russia.ru/2017/11/05/bim-s-pozitsii-ekspluatatsii-obekta-ot-informatsionnoj-modeli-k-facility-management/> (access date: 02.11.2018). (rus)
14. Vikki Edmondson, Martin Cerny, Michael Lim, Barry Gledson, John Woodward A smart sewer asset information model to enable an 'Internet of Things' for operational wastewater management. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 91. P. 193–205.
15. Akinade O.O., Oyedele L.O., Saheed O. A., Muhammad B., Hafiz A.A., Owolabi H.A., Omolola O.A. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 180. Pp. 375–385.

Information about the authors

Knyazeva, Natalya V. PhD, Associate Professor. E-mail: nknyazeva@mgsu.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Levina, Daria A. Bachelor student. E-mail: levinadaraleks@gmail.com. Moscow State University of Civil Engineering (National Research). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received in February 2019

Для цитирования:

Князева Н.В., Лёвина Д.А. Использование BIM-сценариев в работе служб эксплуатации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 99–105. DOI: 10.34031/article_5cd6df471c80b0.92422061

For citation:

Knyazeva N.V., Levina D.A. Using BIM scenarios in operation services. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 5. Pp. 99–105. DOI: 10.34031/article_5cd6df471c80b0.92422061

DOI: 10.34031/article_5cd6df484183d5.29120935

^{1,*}Ильина Т.Н., ¹Емельянов Д.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

*E-mail: ilina50@rambler.ru

О РОЛИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АГЛОМЕРАЦИИ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Аннотация. Рассмотрен механизм поверхностных взаимодействий полидисперсных частиц при их агломерации. Дана характеристика волокнистых материалов на примере измельченных отходов бумаги и картона. Получено уравнение для расчета скорости витания частиц волокнистой структуры в зависимости от их относительных размеров и плотности. Рассмотрены механизмы коагуляции частиц в движущихся воздушных потоках. Показана преобладающая роль коагуляции за счет механизма ускорения для волокнистых материалов. Представлены результаты расчета динамики укрупнения частиц техногенных волокнистых материалов в зависимости от их первоначального размера. Показана целесообразность организации процесса агломерации частиц в торообразных камерах пневмомеханического аппарата под действием центробежных сил.

Ключевые слова: техногенные волокнистые материалы, двухфазные потоки, скорость витания, коагуляция, агломерация, пневмомеханический аппарат.

Введение. Одним из перспективных способов утилизации порошкообразных отходов является получение компактированных тел заданной формы и физико-механических параметров. Среди дисперсных отходов можно выделить группу материалов техногенных материалов с низкой истинной ($200 \dots 900 \text{ кг/м}^3$) и насыпной ($20 \dots 85 \text{ кг/м}^3$) плотностью. Как правило, это волокнистые отходы деревообрабатывающего и целлюлозно-бумажного производств, сельского хозяйства, строительной индустрии, характеризующиеся высокой удельной поверхностью и низкой пластичностью. Для таких материалов процесс переработки с получением компактированной продукции в существующих аппаратах не всегда является эффективным. Для гранулирования таких материалов особое значение приобретают пневмомеханические аппараты, для разработки которых и организации процесса агломерации в воздушных потоках необходимо исследование роли поверхностных взаимодействий с учетом физико-химических свойств волокнистых частиц, скорости витания, коэффициента формы и концентрации частиц в потоке.

Основная часть. Поверхностные взаимодействия между частицами в полидисперсных системах обусловлены наличием свободной поверхностной энергии, накопленной в измельченном материале, особенно при его механоактивации [1]. Процесс агломерации – это физико-механический процесс, при котором происходит стихийное или направленное сближение частиц с образованием тел заданной формы плотности и прочности. В основе агломерации могут быть поверхностные взаимодействия, тепловые или физико-химические превращения [2]. С точки зрения

поверхностных явлений в дисперсных системах агломерацию можно рассматривать как переход системы из свобододисперсного (текучего) состояния, когда дисперсная фаза подвижна, в связнодисперсное, в которой одна из фаз не перемещается свободно (гранулы, брикеты и др.).

Для получения компактированных тел используют технологические связи, как правило, жидкие, взаимодействие которых с поверхностью твердого тела обусловлено свободной поверхностной энергией или межфазным поверхностным натяжением. Необходимая прочность агломератов зависит от адгезии связующего к агломерируемому твердому веществу и собственной высокой когезионной прочности [2, 3].

Поверхностные взаимодействия в полидисперсных системах обусловлены соотношением между силами аутогезии и когезии. Аутогезия частиц характеризует взаимодействия между соприкасающимися частицами. Адгезия частиц означает взаимодействие частиц и твердой поверхности макроскопических тел (стенок и рабочих органов технологических аппаратов и др.). Когезия проявляется в виде связи между молекулами (атомами, ионами) с образованием единого тела. Когезия может возникать также на участках при непосредственном соприкосновении твердых тел.

Взаимодействие между частицами в результате аутогезии проявляется на многих стадиях технологического передела дисперсных материалов, например, при транспортировании, хранении, складировании полидисперсных материалов. При этом происходит так называемая стихийная агломерация без воздействия внешних сил. Образование агломератов происходит также

в воздушных потоках аспирационных систем, например, при обеспыливании технологических процессов многих производств, в том числе и в производстве строительных материалов [4].

Наибольшее распространение получили процессы компактирования дисперсных материалов, в том числе и отходов различных производств, под действием внешних сил с получением тел с требуемыми физико-механическими характеристиками [5, 6].

Механизм образования связей между частицами с получением сформованных тел зависит от многих факторов, характеризующих как физико-механические параметры твердой фазы (минералогический состав, истинная и насыпная плотность, форма частиц, удельная поверхность), так и физико-химические и реологические свойства связующей добавки, ее количества, а также способа реализации процесса компактирования [7]. Представленные в данной работе рекомендации относятся в основном к плотно-кристаллическим дисперсным материалам, в то время как волокнистые материалы состоят из частиц удлиненной формы. Промежутки между волокнами заполнены воздухом у непропитанных материалов или синтетическими смолами у пропитанных.

Структура волокнистой массы ЦБО представлена растительными волокнами, на внешней поверхности которых находится тонкая оболочка, внутри расположена полость (люмен), заполненная протоплазмой, состоящей из белковых веществ (протеинов и протеидов). В протоплазме различают клеточное ядро (кариоплазма) и внеядерную часть (цитоплазма), включающую митохондрии и хроматофоры, которые представлены в виде слоистых спиральных отдельных волокон – фибриллы. Диаметр фибрилл составляет 0,1-0,4 мкм, а ширина их пучков – 1-5 мкм. В большинстве случаев фибриллы уложены равномерно слоями, а в отдельных – спиралевидно [8].

Многочисленные рентгенографические и электронографические исследования показали, что при огромных увеличениях ($50 \cdot 10^3$ раз) микеллярные соединения составлены из отдельных групп макромолекул нитеобразной формы [8]. При диспергировании целлюлозы (распушении волокон) и ее производных достигается огромная удельная поверхность, которая обеспечивает высокую адгезионную способность взаимодействия с окружающими компонентами.

Одним из способов по утилизации целлюлозно-бумажных отходов является производство гранулированных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона (ГСД

ЩМА), введение которых обеспечивает однородность асфальтобетона. В БГТУ им. В.Г. Шухова разработан технологический комплекс для получения экструдированных техногенных материалов различного функционального назначения, в том числе и ГСД ЩМА. Исходным сырьем являются отходы бумаги, картона [9].

Технологический комплекс для переработки ЦБО и их гранулирования с минеральными добавками и связующими включает основные технологические операции, а именно двухстадийное измельчение ЦБО с введением в измельченный материал после шредера добавок; осаждение измельченных ЦБО в аспирационной системе; гранулирование композиционной смеси в плоско-матричном грануляторе с последующей сушкой и классификацией готового продукта в барабанно-винтовом сушильном агрегате.

Предварительный анализ материальных потоков показал, что для повышения эффективности работы технологического комплекса, а именно, снижения количества пыли, поступающей в аспирационную систему и увеличения производительности по готовой продукции, необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования процессов коагуляционно-адсорбционного взаимодействия частиц при агломерации в воздушном потоке с разработкой пневмомеханического устройства для микрогранулирования.

Известно, что с ростом среднего размера частиц и его плотности значительно возрастает эффективность их осаждения в циклонной установке. При очистке газов от пыли существенное значение имеют следующие виды коагуляции, т.е. сцепления частиц: тепловая (за счет броуновского движения), градиентная (при наличии поперечного градиента скорости газа) и турбулентная (за счет механизма ускорения) [10]. Соотношение между этими силами определяется дисперсным составом частиц, их формой, удельной поверхностью, скоростью и температурой движущегося газодисперсного потока. Задачей настоящего исследования является выявление соотношения между этими механизмами с выделением наиболее эффективного для частиц картона, измельченных в роторном измельчителе технологического комплекса.

Проведены исследования физико-химических параметров, измельченных в шредере и молотковой дробилке отходов в виде картона и плотной бумаги типа ватман и пошедших через сито № 2 (2 мм). Истинная плотность измельченного картона составляет 680 кг/м^3 , плотность измельченного ватмана – 889 кг/м^3 . Определение удельной поверхности и среднего размера частиц проводили на автоматизированном приборе

ПСХ-12. Средний размер частиц на входе в циклон составляет 15..17 мкм, пыль после циклона 9-11 мкм, просыпь из классификатора 1..2 мм. Удельная поверхность дисперсных частиц перед циклоном 530....580 м²/кг, после циклона 840...900 м²/кг.

Важной характеристикой волокнистых материалов для оценки возможности их осаждения в циклонной установке является скорость витания. Исследования показали, скорость витания измельченных частиц бумаги, картона составляет от 1.1 до 4.4 м/с для частиц эквивалентного диаметра 0,50....0,8 мм., коэффициент формы 2,0....2,5.

На основании экспериментальных данных нами было получено уравнение для определения скорости витания частиц волокнистых материалов, которое справедливо для частиц измельченных волокнистых материалов с длиной волокон от 2 до 8 мм:

$$v_{\text{вит}} = 1,87\sqrt{0,028a + 0,0043b} - 1; R_{xy} = 0,943, \quad (1)$$

где $a=l/d$ – соотношение между длиной волокна и его диаметром (коэффициент a для волокнистых материалов находится в диапазоне 15–40); $b=\rho_m/\rho_s$ – отношение плотности частицы к плотности воздуха (для диапазона $200 \leq \rho_m \leq 900$ кг/м³).

Расчет механизмов коагуляции частиц проводился по следующим уравнениям.

Скорость убывания счетной концентрации частиц ($n, 1/\text{м}^3$) в результате процесса коагуляции находится из выражения [10]:

$$N = -\frac{dn}{d\tau_k} = -Kn^2, \quad (2)$$

где N – скорость коагуляции – величина, соответствующая числу встреч частиц в единице объема в единицу времени, $1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; τ_k – время коагуляции, с; K – константа коагуляции, м³/с.

Скорость броуновской коагуляции рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{бр}} = 8\pi D_q (n')^2 d_q, \quad (3)$$

где D_q – коэффициент сцепления частиц, характеризующий интенсивность броуновского движения, м²/с.

Градиентная коагуляция происходит при наличии поперечного градиента скорости газов при их движении в потоке, например, течение газов у твердой стенки (в воздуховоде).

Скорость градиентной коагуляции может быть определена по формуле:

$$N_{\text{гр}} = \frac{32}{3} (n')^2 i d_q^3, \quad (4)$$

где i – градиент скорости, с⁻¹; n' – начальная концентрация частиц, $1/\text{м}^3$.

Расчет константы коагуляции по механизму ускорения $K_{\text{уск}}$, м³/с, определяется по формуле [10]:

$$K_{\text{уск}} = \pi \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{v_z^{9/4}}{l^{3/4} v_z^{5/4}} \beta d_q^4, \quad (5)$$

где β – коэффициент, характеризующий распределение частиц по размерам (принимается равным 1); d_q – средний размер частиц, м; v_z – кинематическая вязкость газа, м²/с; v_z – скорость газа, м/с; l – длина трубопровода, м. При движении газового потока по трубе $l=D_{\text{тр}}$.

Средняя масса частиц m_q , кг, в момент времени τ может быть определена по формуле [11]:

$$m_q = \frac{z}{n} = \frac{z(1 + 0,5K_{\text{уск}} n' \tau_k)}{n'} \approx \frac{K_{\text{уск}} z \tau_k}{2}, \quad (6)$$

где z – массовая концентрация частиц, кг/м³; n' – начальная концентрация частиц, $1/\text{м}^3$; τ_k – время коагуляции, с.

Диаметр частицы, увеличенной в процессе коагуляции, определяется по формуле и сравнивается с первоначальным диаметром:

$$d_q = \sqrt[3]{6m_q / \pi \rho_m}, \quad (7)$$

Скорость и константа коагуляции $K_{\text{уск}}$ в значительной степени определяется скоростью газового потока ($N_{\text{уск}} \sim v_z^{9/4}$) [12].

Расчет различных механизмов коагуляции измельченных волокнистых частиц в движущемся потоке при одинаковых динамических условиях показал, что наиболее эффективна коагуляция за счет механизма ускорения, которая на 6 порядков выше броуновской коагуляции и на 3 порядка выше механизма градиентной коагуляции. Поскольку плотность дисперсной фазы значительно выше плотности дисперсионной среды именно коагуляция за счет механизма ускорения имеет большее значение и зависит от массы частиц, коэффициента их формы и скорости витания, за счет различия в скоростях движения частиц дисперсной фазы и дисперсионной среды, а также благодаря волокнистой форме частиц и происходит их взаимодействие, сопровождающееся сцеплением.

По уравнениям (5)–(7) нами произведен расчет коэффициента укрупнения частиц размером 0,5–2,0 мм, которые поступают в циклон технологического комплекса для осаждения и последующего поступления уловленного материала в гранулятор. Результаты расчета представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, размер частиц за счет их сцепления растет с увеличением времени контакта частиц и их первоначального размера. Отсюда следует, что для взаимодействия частиц волокнистых материалов в двухфазном движущемся потоке, т. е. их агломерации, необходимо

увеличение времени взаимодействия и скорости их вращения частиц в поле центробежных сил. Эти условия могут быть реализованы в пневмомеханических аппаратах с торообразными камерами.

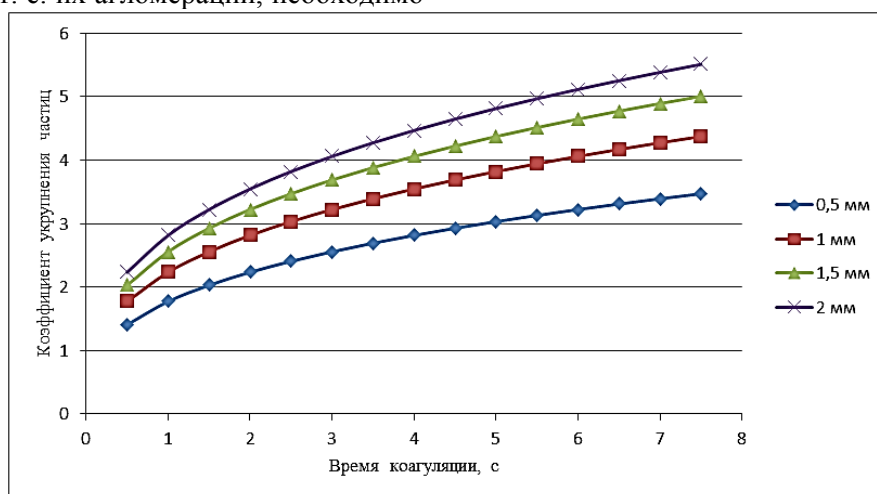


Рис. 1. Динамика укрупнения волокнистых частиц различного первоначального размера

Проведенные нами теоретические исследования позволили разработать математическую модель движения двухфазного потока в торообразных камерах под действием центробежных сил и способ ее решения [13]. Полученные математические зависимости могут быть использованы для описания процессов агломерации частиц в центробежном поле сил газодисперсного потока и послужили теоретической основой для разработки пневмомеханического аппарата [14].

Подтверждением преобладающего механизма ускорения при агломерации частиц является полученная ранее зависимость скорости витания волокнистых частиц от концентрации. Нами установлено, что с увеличением объемной доли волокнистых частиц в потоке создаются условия для их сцепления, образуются агломераты, коэффициент формы которых приближается к единице [15].

Для повышения эффективности процесса агломерации целесообразно использование водных растворов связующих добавок, адсорбирующихся на частицах дисперсного материала с образованием коагуляционно-структурированной прослойки. Спектр связующих добавок широк, выбор зависит от свойств материала, его дисперсности, удельной поверхности, гидрофильности и других физико-химических показателей. Полученные при агломерации гранулы могут быть как промежуточным этапом технологического процесса, так и готовой продукцией в зависимости от предъявляемых к гранулам требований.

Выводы. Для агломерации частиц техногенных волокнистых материалов в движущемся газодисперсном потоке необходимо создать условия для их поверхностных взаимодействий, а именно увеличить время и скорость движения двухфазного потока в центробежном поле, что возможно в торообразных камерах пневмомеханического аппарата. Технологические параметры процесса и выбор связующего определяются требованиями к физико-механическим характеристикам готовой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евтушенко Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. 193 с.
2. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: Монография. Белгород: Изд-во БГТУ. 2009. 229 с.
3. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов // ВНИИЭСМ. 1994. 297 с.
4. Ильина Т.Н. Снижение пылеуноса из вращающейся цементной печи // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. №10. С. 36–40.
5. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Гонопольский А.М, Трефилова Я.А. Особенности выбора гранулирующего оборудования многокомпонентных полидисперсных шихт со вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа // Вестник МГОУ. Серия Естественные науки. 2013. № 1. С. 49–64.

6. 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 им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 102–106.

7. Ilina T.N. Classification of Fine Materials and Recommendations for Sintering // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Т. 49. №. 3–4. С. 229–232.

8. Корда И., Либнар З., Прокоп И. (перевод с чешского). Разлом бумажной массы. М.: Изд-во «Лесная промышленность». 1967. 421 с.

9. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Севостьянов М.В., Трубаев П.А., Уральский В.И., Филатов В.И., Кошуков А.В. Пат. 2567519 Российская Федерация, МПК А23К 1/20. Технологическая линия и способ для экструдирования техногенных волокнистых материалов. № 2014149776/13, опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. 10 с.

10. Вальдберг А.Ю., Куцев Л.А. Расчет пыле- и каплеулавливающих установок: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010. 172 с.

Информация об авторах

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

Емельянов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, инженер кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: dimon8-8@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в февраль 2019 г.

© Ильина Т.Н., Емельянов Д.А., 2019

^{1,*} Ilina T.N., ¹ Emel'yanov D.A.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: ilina50@rambler.ru

ON THE ROLE OF SURFACE INTERACTIONS OF PARTICLES OF FIBER STRUCTURE DURING AGGLOMERATION IN THE AIR FLOW

Abstract. The mechanism of surface interactions of polydisperse particles during agglomeration is considered. The characteristic of fibrous materials is given on the example of shredded waste paper and cardboard. An equation is obtained for calculating the soaring speed of the particles of the fibrous structure depending on their relative sizes and density. The mechanisms of coagulation of particles in moving air streams are considered. The prevailing role of coagulation due to the acceleration mechanism for fibrous materials is shown. The results of the calculation of the dynamics of particle enlargement of technogenic fibrous materials depending on their initial size are presented. The expediency of organizing the process of agglomeration of particles in the toroidal chambers of a pneumomechanical apparatus under the action of centrifugal forces is shown.

Keywords: technogenic fibrous materials, two-phase flow soaring speed, coagulation, agglomeration, pneumomechanical apparatus.

REFERENCES

1. Evtushenko E.I. Activation processes in the technology of building materials [Aktivatsionnye pro-

11. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР. 1965. 160 с.

12. Вальдберг А.Ю., Николайкина Н.Е. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. М.: Дрофа. 2008. 239 с.

13. Ильина Т.Н., Бойчук И.П., Емельянов Д.А. О взаимодействии частиц волокнистых материалов в воздушном потоке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 116–121.

14. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Шкарпеткин Е.А. Осокин А.В., Бойчук И.П., Емельянов Д.А. Патент РФ на полезную модель № 162472. Пневмомеханическое устройство для микрогранулирования дисперсных материалов, опубл. 10.06.2016 Бюл. № 16.

15. Емельянов Д.А., Плотников К.В. О влиянии объемной концентрации техногенных волокнистых материалов на коэффициент формы частиц в материально-воздушном потоке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 91–95.

cessy v tekhnologii stroitel'nykh materialov]. Belgorod: Publishing House of BSTU. V.G. Shukhov, 2003. 193 p. (rus)

2. Ilina T.N. Agglomeration processes in the processing technologies of dispersed materials [*Processy aglomeratsii v tekhnologiyah pere-rabotki dispersnykh materialov*]: Monograph. Belgorod: BGTU publishing house. 2009. 229p. (rus)

3. Sulimenko L.M., Albats B.S. Agglomeration processes in the production of building materials [*Agglomeratsionnye processy v proizvodstve stroitel'nykh materialov*]. VNIIESM. 1994. 297 p. (rus)

4. Ilina T.N. Reduction of dust removal from a rotating cement kiln [*Snizhenie pyleunosa iz vrashchayushcheysya cementnoj pechi*]. Chemical and oil and gas engineering. 2008. No. 10. Pp. 36–40. (rus)

5. Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Gonopolsky A.M., Trefilova Ya.A. Features of the choice of granulating equipment of multi-component polydisperse charges with secondary material resources based on system analysis [*Osobennosti vybora granuliruyushchego oboru-dovaniya mnogokomponentnykh polidispersnykh shiht so vtorichnymi material'nymi re-sursami na osnove sistemnogo analiza*]. Bulletin of Moscow Region State University. Series Natural Sciences. 2013. No. 1. P. 49–64. (rus)

6. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Gridchin A.M., Uralsky V.I., Sevostyanov M.V., Yadykina V.V. Resource and Energy Saving Modules for the Complex Utilization of Technogenic Materials [*Resurso-ehnergosberegayushchie moduli dlya kompleksnoj utilizatsii tekhnogennykh materialov*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 6. Pp. 102–106. (rus)

7. Il'ina T.N. Classification of Fine Materials and Recommendations for Sintering. Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 49. No. 3–4. Pp. 229–232.

8. Korda I., Libnar Z., Prokop I. (translation from Czech). Breaking paper stock [*Razlom bumazhnoj massy*]. M.: Publishing house Forest industry. 1967. 421 p. (rus)

9. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Gridchin A.M., Sevostyanov M.V., Trubaev P.A., Ural V.I., Philats V.I., Koshchukov A.V. Pat. 2567519 Russian Federation, IPC A23K 1/20. Technological line and method for the extrusion of man-made fibrous materials [*Tekhnologicheskaya liniya i sposob dlya ehkstrudirovaniya tekhnogennykh voloknistykh materialov*] No. 2014149776/13. (rus)

10. Waldberg A.Yu., Kushev L.A. Calculation of dust and dropping installations [*Raschet pyle i kapleulavlivayushchih ustanovok*]. Manual. Belgorod: BGTU publishing house. 2010. 172 p. (rus.)

11. Fuchs N.A. Advances in aerosol mechanics [*Uspekhi mekhaniki aehrozolej*]. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1965. 160 p. (rus)

12. Waldberg A.Yu., Nikolaykina N.E. Processes and devices for environmental protection [*Processy i apparaty zashchity okruzhayushchej sredy*]. M.: Bustard. 2008. 239 p. (Rus.)

13. Ilina T.N., Boychuk I.P., Emelyanov D.A. On the interaction of particles of fibrous materials in the air flow [*O vzaimodejstvii chastic voloknistykh materialov v vozdushnom potoke*] Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 116–121. (rus)

14. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Ilyina T.N., Sevostyanov M.V., Shkarpetkin E.A., Osokin A.V., Boychuk I.P., Yemelyanov D.A. RF Patent for Utility Model Pneumatic-mechanical device for microgranulation of dispersed materials. [*Pnevmorekhanicheskoe ustrojstvo dlya mikro-granulirovaniya dispersnykh materialov*]. No. 162472. (rus)

15. Yemelyanov D.A., Plotnikov K.V. On the effect of the volume concentration of technogenic fibrous materials on the shape factor of particles in the material-air flow [*O vliyani ob'emnoj koncentratsii tekhnogennykh voloknistykh materialov na koefitsient formy chastic v material'no-vozdushnom potoke*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. № 3. Pp. 91–95. (rus)

Information about the authors

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

Emel'anov, Dmitriy A. PhD. E-mail: dimon8-8@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in February 2019

Для цитирования:

Ильина Т.Н., Емельянов Д.А. О роли поверхностных взаимодействий частиц волокнистой структуры при агломерации в воздушном потоке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 106–111. DOI: 10.34031/article_5cd6df484183d5.29120935

For citation:

Il'ina T.N., Emel'anov D.A. On the role of surface interactions of particles of a fibrous structure during agglomeration in an air stream. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 106–111. DOI: 10.34031/article_5cd6df484183d5.29120935

DOI: 10.34031/article_5cd6df476cf3b9.73069500

^{1,*}Былова Н.С., ¹Акчурина Н.С.¹Уральский государственный архитектурно-художественный университет

Россия, 620075, г. Екатеринбург ул. К. Либкнехта 23

*E-mail: nataly.bylova@mail.ru

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ОМСКА XIX-XX ВВ.

Аннотация. В статье рассмотрены общемировые, а также отечественные подходы к сохранению промышленного наследия, их адаптивного использования через призму международных форумов, проводившихся по данной тематике. Описываются градостроительные предпосылки формирования промышленных и инфраструктурных объектов в городской среде Омска XIX – нач. XX вв. Положено начало классификации объектов по времени функционирования, типологическим особенностям, имущественной принадлежности, периоду постройки, владельцах, производственных мощностях и т.д. Выявлена историческая карта 1913 года с нанесением на нее вновь выявленных промышленных объектов Омска. На основе анализа комплексов, зданий и отдельных фрагментов определены возможные перспективы конверсии индустриального наследия Омска.

Ключевые слова: промышленное наследие, архитектура Омска, индустриальная конверсия, промышленность Омска.

Введение. В городах постсоветского пространства большую роль играют промышленные территории, хранящие следы прошлого. Ранее, являясь ядром развития городов, сейчас они остановлены и представляют собой неиспользуемое городское пространство. Несмотря на то, что промышленные предприятия утратили свою основную функцию, они сохранили историческую и художественную ценность.

В этом архитектурном слое существует еще более узкая прослойка дореволюционной промышленной архитектуры XIX нач. XX вв., которая мало изучена в Омске; более того, многие из ее образцов полностью разрушены или находятся в заброшенном состоянии. Это является следствием недостаточного понимания ценности старых зданий, важности их сохранения и адаптивного использования, несмотря на существующую правовую и законодательную основу. Поскольку подход к реновации, как правило, определяет уровень строительной культуры.

Архитектурное наследие XIX -начала XX веков Омска является актуальной темой для изучения. Необходимо изучать отечественную архитектуру данного периода, учитывая процессы, которые происходили в провинциальных городах. Поскольку в них стилевые течения отражались по-своему. Это было связано с тем, что уходило определенное количество времени на внедрение того или иного течения, происходило осмысление характерных архитектурных признаков, применялось собственное понимание и стилевая трактовка. Таким образом, необходимо работать комплексно, а именно, выполнять проекты охранных зон, комплексную реновацию исторических центров и ансамблей, реставрацию и реконструкцию и консервацию отдельных памятников промышленной архитектуры.

Важность сохранения промышленного наследия в современном городском ландшафте является общепризнанным фактом, который неоднократно обсуждался на международных конгрессах и конференциях.

В 1928 году был создан Международный Конгресс Современной Архитектуры (CIAM). Его целью было объединить архитекторов со всей Европы. Он являлся международной площадкой для обмена знаниями в интересах развития современной в то время архитектуры. Произошла серия архитектурных конгрессов, где продвигались передовые идеи архитектуры, от глобальных вопросов окружающей среды и градостроительства до промышленного дизайна. Один из них в рамках CIAM проходил в Афинах, в 1931 г. (Международный Конгресс Современной Архитектуры, принята «Афинская хартия»), где был введен термин «всемирное наследие».

Позже, в Венеции, в 1964 г. проходил I Международный Конгресс архитекторов и технических специалистов по историческим памятникам, по итогам которого была принята «Венецианская хартия». Она оказала огромное значение в деле сохранения культурного наследия. Положения хартии определяли роль исторического памятника в городской среде, а целью являлось сохранение памятников как произведений архитектурного зодчества и свидетелей истории.

Потомки должны были передать последующим поколениям архитектурные сооружения во всем богатстве их подлинности. Поэтому существовала позиция четкого разделения старого и нового. Но на сегодняшний день положения Хартии вызывают споры и разногласия. Поскольку на момент принятия этого документа модернизм, был по сути единственным стилем, а памятникам

авангарда было по 30-40 лет, поэтому подражание прошедшим стилям в архитектуре казались подделкой «под старину». На практике это было сочетанием стеклянных стен и металлических стоек со стилем барокко и классицизма, где металлические колонны соседствовали с лепниной и росписью. Возникал спор между представителями классической архитектуры и модернистами, за что первых называли фальсификаторами.

По мнению представителей ЮНЕСКО и ICOMOS при реставрации памятника архитектуры и дополнения его современными постройками, необходимо обозначить границу между историческими частями и современными включениями, избегая создания «пародии». Спустя 50 лет ситуация изменилась. Сейчас большая часть построек модернизма обветшала и уже они требуют восстановления и реставрации. Как, например, дом-коммуна М. Гинзбурга в Москве, у которого разрушается балкон. Согласно Хартии, необходимо вместо него сделать парадный балкон в историческом стиле. Другое дело – стены Лувра, старинного королевского дворца со стеклянной пирамидой в центре. Это является примером четкого разделения старой постройки и стиля от вновь созданных.

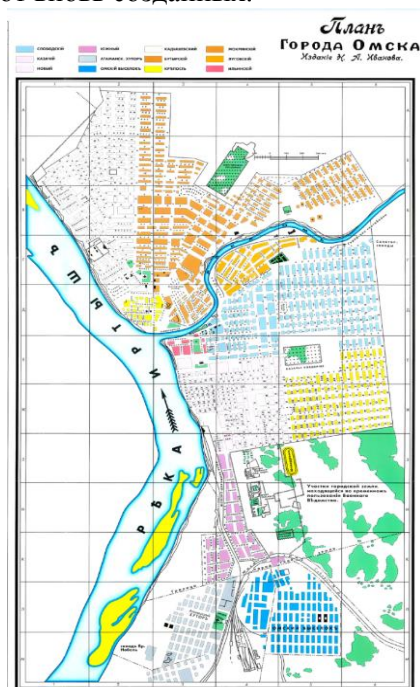


Рис. 1. Карта Омска 1913 года с разделением на форштадты.

Источник: <http://www.etomesto.ru>

В научном исследовании Гуменюк А.Н. «Архитектура Омска XIX – начала XX веков» работы Д.Е. Аркина показывают художественный анализ памятников, а также раскрывается вопрос изучения классического наследия. В исследованиях Г.Г. Гримма «Архитектор Андриан Захаров. Жизнь и творчество» 1940-х и В.И. Пилявского

«Градостроительные мероприятия и образцовые проекты в России в начале XX века» начала 1960-х годов рассказывается о творчестве выдающихся архитекторов стиля классицизм А.Д. Захарова и В.П. Стасов [1, 2, 3, 4, 5]. В том числе по проектам данных архитекторов велось строительство ключевых зданий в провинциальных городах России.

По своей проблематике и кругу затрагиваемых вопросов к ним близки научные труды известных специалистов в архитектуроведении таких, как И.А. Бартенев «Зодчие итальянского ренессанса», В.Н. Батажкова «Сибирский архитектор», В.Л. Глазычев «Эволюция творчества в архитектуре», А.И. Иконников «Тысяча лет русской архитектуры», А.И. Каплун «Стиль и архитектура», М.В. Нащокина «Сто архитекторов Московского модерна. Творческие портреты», Г.А. Оль «Александр Брюллов», Т.А. Петрова «Андрей Штакеншнейдер», Т.Ф. Саваренская, Д.О. Швидковский и др. «История градостроительного искусства». [10, 12, 9, 15, 13, 16]

Объектами для исследования были выделены промышленные здания и сооружения Омска XIX – начала XX веков. Базой источников для данного исследования послужили архивные материалы: архитектурные проекты, чертежи, сметы, исторические фотографии, списки, личные дела. Активное промышленное развитие Омск получил в конце XIX – нач. XX вв. В этот период он развивается наравне с такими городами как Екатеринбург, Тюмень, Иркутск и др. Это связано, прежде всего, с реформами П.А. Столыпина и строительством Транссибирской железной дороги в конце XIX века. Вследствие этого, увеличился приток трудовых ресурсов, что способствовало развитию промышленности, и вместе с тем, каменного строительства. Согласно карте 1913 года Омск состоял из упраздненной военной крепости, 7 форштадтов и нескольких поселков (рис. 1).

Возникнув как крепость, постепенно Омск превращается в город, привычный современному горожанину, и становится не только административным, но и торгово-промышленным Западно-Сибирским центром.

Изначально «Омск возник как крепость для защиты порубежных владений России на юге Западной Сибири от набегов кочевников и опорный пункт для дальнейшего освоения верхнего Прииртышья» [2]. Первая Омская крепость была заложена в 1716 году, эта дата считается годом основания Омска, а впоследствии было принято решение перенести ее на противоположный берег Оми, с фортификационной точки зрения это решение было более грамотным. На территории Второй Омской крепости размещались военные

казармы и склады, дом инженерного управления, а также сохранившиеся до наших дней денежная кладовая, гауптвахта, лютеранская церковь и др. Архитектурной доминантой является Воскресенский военный собор, восстановленный на выявленном краеводами и историками фундаменте в 2016 году к 300-летию Омска.

Обрастая посадами, изначально крепостной город, со временем приобрел тип провинциального и в 1829 году получил регулярный план, разработанный петербургским архитектором В.И. фон Гесте на основе уже существовавшего городского плана конца XVIII века. «...Омск получил план, обеспечивший ему на много лет вперед правильное развитие, краевые перспективы улиц и интересные архитектурные ансамбли...» (к 1822 году он становится центром первой Омской области, в 1839 – центром Западно-Сибирского генерал-губернаторства, с 1882 – Степного края). Одновременно с этим, город был центром области сибирских киргизов (с 1854 года), преобразованной в 1868 году в Акмолинскую область. Градостроительное развитие вело к увеличению военных и гражданских чиновников разных ведомств, к строительству новых зданий и сооружений и формированию полноценной городской

среды. Появляются здания в стиле классицизм – Никольский казачий собор, архитектор В. Стасов, здание Сибирского Кадетского корпуса, архитектор Захаров и др.

В это время стали приезжать представители зарубежных фирм, деятели культуры и архитекторы из Москвы и С-Петербурга; строятся Торговые московские ряды на Любинском проспекте, магазины, торговые лавки и промышленные предприятия. До наших дней сохранились не многочисленные, но ценнейшие промышленные комплексы рубежа веков, что дает поле для научных исследований и практической конверсии. С началом научной работы было установлено, что зачастую объекты полностью утрачены, некоторые перестроены до неузнаваемости, другие сохранили лишь часть корпусов в измененном виде. Одним из примеров является Центральная электростанция на периферии 2й Омской крепости. В советский период, когда требовалось увеличение производственных мощностей, к ней были пристроены дополнительные корпуса, увеличена этажность, вследствие чего изменилась первоначальная композиция фасадов. В 2008 году часть зданий советского периода была демонтирована (рис. 2.).



1. Здание Центральной электростанции (ЦЭС)



2. Дрожжевой завод 1917 г

Рис. 2. Центральная электростанция в Омске. Фото из личного архива

На территории Атаманского хутора, близ железнодорожной ветки в 1896 году открываются ж/д мастерские. Позже, в 1930 году, на этом месте введен в эксплуатацию Омский паровозоремонтный завод им. Рудзутака, который обеспечивал паровозами и вагонами железные дороги Западной и Восточной Сибири. На данный момент часть корпусов сохранилась.

На территории Атаманского хутора, близ железнодорожной ветки в 1896 году открываются ж/д мастерские. Позже, в 1930 году, на этом месте введен в эксплуатацию Омский паровозоремонтный завод им. Рудзутака, который обеспечивал паровозами и вагонами железные дороги Западной и Восточной Сибири. На данный момент часть корпусов сохранилась.

В Кадышевском форштадте размещались спиртово-водочные предприятия:

Казенные винные склады (рис. 3),

Пивоваренный, Солодовый и Дрожжевой заводы (рис. 3.1).

Здание Центральной электростанции (ЦЭС).
Источник: <http://omskregion.info>.

Дрожжевой завод 1917 г.п. Источник: frogged55.livejournal.com

Паровозные ж/д мастерские 1985-1986 г.п.
Источник: panteleich.livejournal.com

Казенные винные склады 1901-1902 г. п. Фото из личного архива), а также Лесопилки и Механические мастерские. Их расположение обусловлено тем, что технологически было необходимо размещение предприятий ниже по течению для сбросов и выход к реке для погрузочных работ. В Слободском форштадте, вдоль реки Омь, были сгруппированы городские скотобойни и салотопенные заводы.



3. Паровозные мастерские ЖД 1985-1986 гг.



4. Казенный винный склад 1901-1902 гг.

Рис. 3. Казенные винные склады

На территории Бутырского форштадта размещались предприятия тяжелой промышленности: Чугунолитейный и механический завод, основанный в 1901 году датчанином С.Х. Рандрупом, Колесный завод, Механическая столярная мастерская. Кирпичные заводы располагались на берегу рек с доступом к песчаным намывам и к транспортным артериям: речной и ж/д ветке.

Стоит отметить, что промышленные постройки XIX-нач. XX вв. отличаются архитектурным своеобразием. При том, что преимущественно строились эти здания по типовым проектам, инженеры того времени утилитарные технические сооружения старались вписать в застройку. Они были построены в основном из красного кирпича с пластически богатыми фасадами, напоминая средневековую крепостную архитектуру, чем промышленные предприятия (рис. 4). В наше время сохранившиеся, часто в руинированном состоянии объекты имеют живописный романтический облик.



Рис. 4. Сохранившиеся, часто в руинированном состоянии объекты

Особый интерес представляют здания и ансамбли, до сих пор являющиеся узловыми элементами культурного каркаса. Сейчас общая этажность города возросла, силуэт застройки заметно изменился, но они сохраняют свое первоначальное состояние и со-масштабность человеку. Такими являются, сохранившиеся до наших

дней, Центральная электростанция (ЦЭС) (рис. 4), Казенные винные склады в Кадышевском форштадте, (нынешняя ул. Волочаевская) (рис. 3), Табачная фабрика Г.Я. Серебрякова в Слободском форштадте, на улице Лермонтова, Обувная фабрика «Луч», на улице Интернациональная в Бутырском форштадте (рис. 4). Также, находящиеся в глубине застройки, но при этом не менее значимые объекты- Дрожжевой завод и Железнодорожные мастерские (рис. 3).

Они были передовыми для своего времени как по техническому оснащению (было электричество, трамвайная или ж/д ветка), так и в отношении архитектурного облика, являясь городской доминантой среди частной одноэтажной застройки Омска и в полной мере служили основой для архитектурной композиции города (рис. 5).



Рис. 5. Турбинный зал Центральной электростанции. Часть сохранившегося оборудования турбинного зала. Фото из личного архива

Так, например, для оснащения Центральной электростанции энергетическое оборудование было заказано из Англии. Сельская энергетика по темпу развития не отставала, она получила свое развитие еще в начале XX в. На заимке Ф.Ф. Штумпфа была ветряная электростанция. Появлялись стационарные и передвижные электростанции.

Тема промышленного наследия рубежа веков в архитектуре Омска разработана мало. Некоторые, наиболее значимые, объекты в той или

иной степени рассматривались специалистами, становились предметом изучения и экспериментального проектирования.

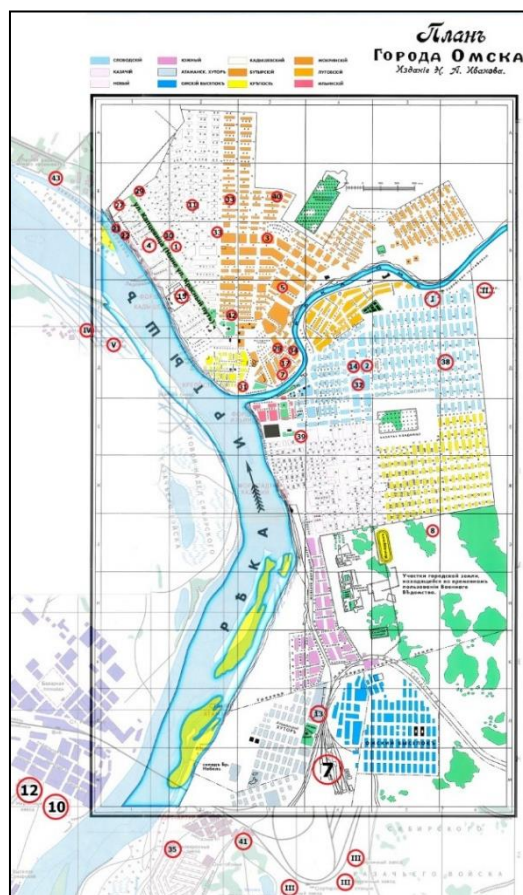


Рис. 6. Карта с нанесением установленных промышленных предприятий Омска XIX - нач. XX вв.

Источник: <http://www.etomesto.ru/>

- | | |
|---|---|
| 1 – Чугунолитейный завод «Пионер» | 21 – Паровые мельницы |
| 2 – Чугунолитейный и механический завод | 22 – Паровые мельницы |
| 3 – Плугостроительный, чугунолитейный и механический завод | 27 – Омский №1 дрожжево-винокурный завод |
| 4 – Энергия, фабрика с-х. машин (Фабрика вейлок) | 28 – №8 пивовар. Зав. "Бавария" |
| 5 – Колесный завод (Расположение приблизительное) | 29 – №1 Пивоваренный завод |
| 6 – Фабрика металлических изделий | 30 – Солодовый завод |
| 7 – Железнодорожные мастерские | 31 – Центральная электростанция (ЦЭС) |
| 8 – Кирпичный завод (Расположение приблизительное) | 32 – Табачная фабрика Серебрякова Я. М. |
| 10 – Кирпичный завод (Ременникова А.И.) | 33 – Паровые мельницы |
| 11 – Кирпичный завод | 34 – Пивоваренный завод |
| 12 – Кирпичный завод (Хобец Семен Адамович) | 35 – "Орел", Т-во, пивоваренный завод, крахмало-паточный завод |
| 13 – Товарищество, «Довборы», красочный и маслобойный завод | 38 – Мыловаренный завод |
| 14 – Завод колесной мази | 39 – Суконная фабрика Сибирского корпуса |
| 15 – Казенный винный склад №1 | 40 – Омский Епархиальный свечной завод (Расположение приблизительное) |
| 17 – Торгово-Промышленное Т-во, завод искусств и минеральных фруктово-ягодных вод | 41 – Скотобойня |
| | 42 – Обувная фабрика «Луч» |
| | 43 – Судоремонтный завод |

В 1910-е годы Омск активно развивается, это происходит за счет присоединения новых кварталов. Особенно активно велась застройка в районе

железнодорожного вокзала, изменение планировочной структуры происходило благодаря развитию новых градообразующих центров. Важным

событием стало открытие Первой Западно-Сибирской, сельскохозяйственной, лесной и торгово-промышленной выставки в 1911 г. Она положила начало освоению значительной территории в южной части города, способствовала его благоустройству в целом и дала возможность сибирским архитекторам разрабатывать новый тип здания – выставочный павильон. В 1910-е годы промышленная архитектура Омска воплотила в себе стилевые направления модерна и неоклассицизма, которые были развиты в столичных городах и не уступал по уровню художественной выразительности.

Архитектура омского модерна имела свои специфические черты, наиболее ярко проявившиеся в «кирпичном модерне».

В результате строительства по заказным и конкурсным проектам известных столичных и сибирских зодчих, Омск получил целый ряд монументальных зданий в красно-кирпичном стиле, возведенных на европейском уровне.

В связи с чем Омск начинает приобретать устойчивые черты современного города европейского типа, утрачивая при этом остаточные признаки военного поселения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аркин Д.Е. Образы архитектуры и образы скульптуры. М., 1990.
2. Гримм Г.Г. Архитектор Андриан Захаров. Жизнь и творчество. М., 1940.
3. Гуменюк А.Н. Архитектура Омска XIX – начала XX веков: дисс кандидата искусствоведения. Российская академия художеств. С.-Пет. Гос-ый академический институт живописи, скульптуры и архитектуры им. И.Е. Репина, С.-Петербург, 2002.
4. Пилявский В.И. Градостроительные мероприятия и образцовые проекты в России в нач. XX в. // Архитектурная практика и история архитектуры. Сборник научных трудов. М., 1958. Вып. 21.
5. Захарова А.Д. Ежегодный сбор архитекторов-художников. М., 1953.
6. Стасова В.П. Иллюстрированная хроника событий. М., 1960.
7. Ожегов С.С. Типовое и повторное строительство в России в XVIII-XIX веках. М., 1984.
8. Поспелов Г.Г. «Архитектура и конструкция эрхеров», В.С. Турчин «Воспоминания о сибири».
9. Нащокина М.В. Сто архитекторов московского модерна. Творческие портреты. М., 2000.
10. Бартенев И.А. Зодчие итальянского Ренессанса. Л., 1936.
11. Глазычев В.Л. Эволюция творчества в архитектуре. М., 1986.
12. Батажкова В.Н. «Сибирский архитектор».
13. Иконников А.В. Тысяча лет русской архитектуры. М., 1990.
14. Каплун А.И. Стиль и архитектура. М., 1985.
15. Оль Г.А. Александр Брюллов. Л., 1983.
16. Петрова Т.А. Андрей Штакеншнейдер. Д., 1978.
17. Саваренская Т.Ф., Швидковский Д.О., Петров Ф.А. История градостроительного искусства. М., 1989.
18. Власюк А.И. О своеобразии архитектуры русских провинциальных городов в 1840–1910-е годы // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. М., 1983.
19. Орельская О.В. Архитектура эпохи модерна в Нижнем Новгороде. Нижний Новгород, 2000.
20. Душкина Н. «Юбилей Венецианской хартии» // Архитектура СССР. 1990. Июль – август, С. 22–25.
21. Кочадамов В.И. Омск. Как рос и строился город. Омск.: Омское книжное издательство, 1960. 112 с.
22. Коченовский О. Конференция в Таллине. // Архитектура СССР. 1984. март-апрель. С. 120.
23. Новиков Н. Реконструкция как процесс // Архитектура СССР. 1989. март-апрель. С. 111–116.
24. Ребайн Т. Концепция оценки и сохранности исторической застройки Самары. Венецианская хартия // Реставрация музейных ценностей. 1998. №1. С. 40–42.
25. Афинская Хартия. Общие положения. Город и его окружение [Электронный ресурс] / Московская школа конфликтологии – Режим доступа: <http://conflictmanagement.ru/i-obshhie-polozheniya-gorod-i-ego-okruzhenie>
26. Храпова Н.С. Развитие городской среды XIX века по статистическим ведомостям о состоянии города Омска [Электронный ресурс] // IAOO.RU: Исторический архив Омской области – Режим доступа: <http://iaoo.ru/note310.html> - 31.01.2018
27. Эрмитаж в Главном штабе: Лувр будет локти кусать от зависти [Электронный ресурс] // REGNU Минформационное агентство – Режим доступа: <https://regnum.ru/news/1703932.html>
28. Штиглиц М.С. Промышленная архитектура Петербурга. 2-е издание, исправленное и доп. Спб.: Журнал "Нева", 1996. 132 с.

Информация об авторах

Былова Наталья Сергеевна, аспирант. E-mail: nataly.bylova@mail.ru. Уральский государственный архитектурно-художественный университет. Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта 23.

Акчурина Наталья Сергеевна, кандидат архитектуры, профессор, профессор кафедры Архитектурного проектирования. E-mail: akchurinans@mail.ru. Уральский государственный архитектурно-художественный университет. Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта 23.

Поступила в марте 2019 г.

©Былова Н.С., Акчурина Н.С., 2019

^{1,*}Bylova N.S., ¹Akchurina N.S.

¹Ural State University of Architecture and Art
Russia, 620075, Ekaterinburg, K. Libknehta, 23

*E-mail: nataly.bylova@mail.ru

EXPERIENCE OF STUDYING THE INDUSTRIAL ARCHITECTURE OF OMSK IN THE XIX-XX CENTURIES

Abstract. The article discusses global and domestic approaches to the preservation of industrial heritage, their adaptive use through the prism of international forums on this topic. Urban prerequisites for the formation of industrial and infrastructure facilities in the urban environment of Omsk in XIX- early XX centuries are described. A start has been made for the classification of objects: according to the time of operation, typological features, property, period of construction, owners, production facilities, etc. The historical map of 1913 with the application of newly discovered industrial facilities of Omsk is presented. Possible prospects for the conversion of the industrial heritage of Omsk are determined, based on the analysis of complexes, buildings and individual fragments.

Keywords: industrial heritage, architecture of Omsk, industrial conversion, industry of Omsk.

REFERENCES

1. Arkin D.E. Images of architecture and images of sculpture [Образы архитектуры и образы скульптуры]. М., 1990. (rus)
2. Grimm G.G. Architect Andrian Zakharov [Архитектор Андриан Захаров]. Life and creativity. М., 1940. (rus)
3. Gumenyuk A.N. Architecture of Omsk XIX - early XX centuries: the diss of the candidate of art history [Архитектура Омска XIX - начала XX веков: дисс кандидата искусствоведения. Российская академия художеств]. S. Pet. Gosnyj akademicheskij institut zhivopisi, skul'ptury i arhitektury im. I.E. Repina, S. Peterburg, 2002. (rus)
4. Pilyavsky V.I. Urban planning activities and exemplary projects russia in the early XX century [Градостроительные мероприятия и образцовые проекты в России в нач. XX в.]. Architectural practice and history of architecture. Collection of proceedings. М., 1958. Iss. 21. (rus)
5. Zakharov D.A. Annual gathering of architects-artists [Ежегодный сбор архитекторов-художников] Архитектурная практика и история архитектуры. Сборник научных трудов. М., 1953. (rus)
6. Stasova V. P. Illustrated chronicle of events [Иллюстрированная хроника событий]. М., 1960.
7. Ozhegov S.S. Standard and re-construction russia in the XVIII-XIX centuries [Типовое и повторное строител'ство в России в XVIII-XIX веках]. М., 1984. (rus)
8. Pospelov G.G. Erher Architecture and construction", B.C. Turchin Memories of Siberia» [Архитектура и конструкция эреров», B.C. Turchin «Vospominaniya o sibirii»]. (rus)
9. Nashchokina M.V. One Hundred architects of Moscow art Nouveau [Сто архитекторов московского модерна. Творческие портреты]. Creative portrait. М., 2000. (rus)
10. Bartenev I.A. Architects of the Italian Renaissance [Зодчие итал'янского Ренессанса]. Л., 1936. (rus)
11. Glazychev B. II. Evolution of creativity in architecture [Evoluciya tvorchestva v arhitekture]. М., 1986. (rus)
12. Batakova V.N. «Siberian architect» [«Siberian architect»]. (rus)
13. Ikonnikov A.V. Thousand years of Russian architecture [Tysyacha let russkoj arhitektury]. М., 1990. (rus)
14. Kaplun A.I. Style and architecture [Stil' i arhitektura]. М., 1985. (rus)
15. Ol G.A. Alexander Bryullov [Aleksandr Bryullov]. Л., 1983. (rus)
16. Petrov T.A. Andrey Shtakenshneider [Andrej Shtakenshneider]. Д., 1978. (rus)

17. Savarenskaya T.F., Shvidkovsky D.O., Petrov F.A. History of town-planning art [*Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva*]. M., 1989. (rus)

18. Vlasjuk A.I. On the originality of architecture of Russian provincial cities in 1840–1910-ye [*O svoeobrazii arhitektury russkih provincial'nyh gorodov v 1840–1910-e gody*]. Monuments of Russian architecture and monumental art. M., 1983. (rus)

19. Orelan O.V. Architecture of the modern era in Nizhny Novgorod [*Arhitektura epohi moderna v Nizhnem Novgorode*]. Nizhny Novgorod, 2000. (rus)

20. Dushkina N. «Anniversary of the Venice Charter» [*Yubilej Venecianskoj hartii*]. Architecture of the USSR. 1990. July-August. Pp. 22–25. (rus)

21. Kochegarov V.I. Omsk. As grown and built the city [*Omsk. Kak ros i stroilsya gorod*]. Omsk. Omsk book publishing house, 1960. 112 p. (rus)

22. Kochanovski O. Conference in Tallinn [*Konferenciya v Talline*]. Architecture of the USSR. 1984. March-April, 120 p. (rus)

23. Novikov N. Reconstruction as a process [*Rekonstrukciya kak process*]. Architecture of the USSR. 1989. March-April. Pp. 111–116. (rus)

24. Rehbein T. Concept of assessment and preservation of historic buildings of Samara. [*Venice*

Charter. koncepciya ocenki i sohrannosti istoricheskoy zastrojki Samary. Venecianskaya hartiya]. Restoration of Museum values. 1998. No. 1. C. 40–42. (rus)

25. Athens Charter. Generalities. City and its surroundings. [*Obshchie polozheniya. Gorod i ego okruzhenie*]. Moscow school of conflictology-access Mode: <http://conflictmanagement.ru/i-obshhie-polozheniya-gorod-i-ego-okruzhenie>. (rus)

26. Khrapova N. With. Razvodyaschaya on statisticserverhost about sostoyaniyami [*Razvitie gorodskoj sredy XIX veka po statisticheskim vedomostyam o sostoyanii goroda Omska*] IA00.RU Historical archive of the Omsk region. Mode of access: <http://ia00.ru/note310.html> 31.01.2018. (rus)

27. The Hermitage in The General staff: the Louvre will bite elbows with envy [*Ermitazh v Glavnom shtabe: Luvr budet lokti kusat' ot zavisti*]. Regnum informatsionnoe Agency-Regime access: <https://regnum.ru/news/1703932.html>. (rus)

28. Stiglitz M.S. Industrial architecture of St. Petersburg [*Promyshlennaya arhitektura Peterburga*]. 2nd edition, corrected and additional - St. Petersburg: Zhurnal "Neva", 1996. 132 p. (rus)

Information about the authors

Bylova, Natalya S. Postgraduate student. E-mail: nataly.bylova@mail.ru. Ural State University of Architecture and Art. Russia, 620075, Ekaterinburg, K. Libknehta, 23.

Akchurina, Natalya S. PhD, Professor. E-mail: akchurinans@mail.ru. Ural State University of Architecture and Art. Russia, 620075, Ekaterinburg, K. Libknehta, 23.

Received in March 2019

Для цитирования:

Былова Н.С., Акчурина Н.С. Опыт изучения промышленной архитектуры Омска XIX-XX вв. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 112–119. DOI: 10.34031/article_5cd6df476cf3b9.73069500

For citation:

Bylova N.S., Akchurina N.S. Experience of studying the industrial architecture of Omsk in the XIX-XX centuries. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 112–119. DOI: 10.34031/article_5cd6df476cf3b9.73069500

DOI:10.34031/article_5cd6df47bbe469.43798065

^{1,*}Аль-Джабери А.А.Х., ¹Перькова М.В., ¹Иванькина Н.А., ¹Аль-Савафи М.Х.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

*E-mail: ahmeda.hanash@uokufa.edu.iq

ТИПОЛОГИЯ ТРАНЗИТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ

Аннотация. Транзитно-ориентированное развитие (ТОР) представляет собой стратегию градостроительного планирования, которая направлена на максимально эффективное использование территории вблизи транспортного узла, а также облегчающую переход к устойчивому развитию городов и регионов. Данное исследование направлено на изучение появления и развития ТОР как одного из аспектов концепции Нового урбанизма в истории городского планирования, а также наиболее важных характеристик ТОР. Важную роль в ТОР и в градостроительстве играет типология, применение которой позволяет упростить управление инфраструктурными проектами за счёт применения стандартов в планировании и развитии, а также обеспечить согласованность действий в различных областях. Кроме того, огромное значение имеет обеспечение поддержки планировщиков, административного аппарата и застройщиков для обеспечения необходимого курса развития в зависимости от таких характеристик как плотность населения, смешение функций, способы передвижения горожан, виды деятельности и др. Кроме того, введение типологии позволяет идентифицировать территорию и ее пользователей с уже существующими проектными решениями или опытом для более тщательного пространственного планирования.

Ключевые слова: градостроительное планирование, Новый урбанизм, транзитно-ориентированное развитие (ТОР).

Введение. Транзитно-ориентированное развитие является одним из положений концепции Нового урбанизма. Появление идеи транспортно-ориентированного развития (ТОР) заставило пересмотреть модели взаимоотношений между транспортом (главным образом, общественным транспортом) и землепользованием. На данный момент ТОР является ключевым инструментом решения проблем урбанизации и транспортной политики во многих странах в связи с его способностью развития более устойчивых транспортных режимов (автобусного и рельсового транспорта, пешеходного и велосипедного передвижения) и снижению зависимости от автомобилей, а следовательно, снижению выбросов парниковых газов и транспортной перегруженности [1].

Впервые термин «транзитно-ориентированное развитие» употребил градостроитель Питер Калтроп в своей книге «The Next American Metropolis Ecology, Community and the American dream». Здесь он описал ТОР, как смешение функций землепользования (жилой, коммерческой застройки, рекреационных зон, торгово-деловых центров, и т.д.) с умеренной и высокой плотностью и с созданием пешеходных кварталов вокруг транспортных узлов, автобусных остановок и коридоров, сконцентрированных местах смешанного функционального использования в стратегически благоприятных точках вдоль направлений транспортной инфраструктуры [2]. Позже к определению Калтропа, была добавлена разработка пешеходных кварталов, не исключая автомобильный транспорт, кроме того

строительство или перепланировка одного или нескольких зданий, дизайн и ориентация которых содействует использованию общественного транспорта [3].

ТОР в различных странах приобретает разные формы. Так, возникшая в США идея «компактного развития» (smart growth), включающая в себя некоторые принципы ТОР, также является положением концепции Нового урбанизма. Кроме того, на протяжении многих лет появились другие термины, передающие идею ТОР, например, «транзитная деревня» (transit village), «развитие, поддерживающее транзит» (transit-supportive development), «благоприятный для транзита дизайн» (transit-friendly design). В российской литературе встречается термин «застройка, ориентированная на массовые виды транспорта». Однако при этом наиболее широко используемым термином остаётся транзитно-ориентированное развитие. В большинстве случаев все термины, описывающие идею ТОР, имеют следующие общие элементы: смешанное функциональное использование, высокая доступность общественного транспорта и способствующая перемещению на общественном транспорте организация городской среды [4]. Так, во многих европейских странах транспортные узлы часто представляют собой нечто большее, чем точки сбора и посадки-высадки пассажиров. Остановки общественного транспорта функционируют как точки притяжения и выступают в роли основы для создания сообщества, главными чертами ко-

торого являются компактность и застройка смешанной функции. Организованная вокруг транспортного узла плотная разнообразная застройка располагает жителей района, работающих горожан и другие группы населения пользоваться автомобилем меньше [5].

Типичные размеры транспортно-ориентированной зоны (территории, спроектированной или реконструированной согласно концепции транзитно-ориентированного развития), варьируются от 20 000 до 40 000 квадратных метров в радиусе 400 метров от транспортного узла. ТОР-зона способна включить в себя от 1000 до 2000 единиц жилья, как квартир, так и частных домов. Коммерческий центр может иметь около 700 000 квадратных метров офисных помещений и 5 500 квадратных метров торговых помещений.

Согласно исследованиям ТОР сосредоточено на [6]:

- продвижении нового способа развития городской территории, включающего в себя разнофункциональную застройку, в том числе жилую и коммерческую, парки и общественные объекты, до которых можно добраться без использования автомобиля;

- установлении минимально возможной оптимальной плотности, как для коммерческого, так и для жилого строительства;

- расположении жилья в пределах 1 км от транспортного узла, исходя из предположения, что пассажиры предпочитают ходить пешком до остановок общественного транспорта;

- строительстве жилых комплексов различной от плотности, типов зданий, цены и формы собственности;

- расположении коммерческих зданий рядом с транспортным узлом;

- создании уличной транспортной сети, обеспечивающей несколько маршрутов для ходьбы и езды на велосипеде между коммерческими районами и окрестностями.

Хотя и нет единого, всеобъемлющего определения, которое представляет концепцию ТОР во многих ее формах, большинство определений ТОР, тем не менее, имеют общие черты. Несмотря на то, что определения различаются по охвату и специфике, большинство из них имеют несколько общих элементов:

1. Плотность (Density): повышение плотности вокруг транспортных узлов в пределах радиуса, равного 400 м;

2. Разнообразие (Diversity): смешанное функциональное использование, жилье, представленное различными типами;

3. Дизайн (Design): пешеходно-ориентированный дизайн [7].

Таким образом, существуют три основных элемента: плотность, разнообразие и дизайн, так называемые 3D, направленные на увеличение доли использования общественного транспорта, езды на велосипеде, пешеходного передвижения и снижения количества автомобильных поездок. Особенности планировки и смешанное функциональное использование транзитно-ориентированных зон могут снижать как рабочие, так и нерабочие автомобильные поездки. Жители таких районов гораздо менее склонны ездить на работу на личном автомобиле, в связи с тем, что общественный транспорт является достаточно надежным и легкодоступным, а пешие и велосипедные прогулки – комфортабельными. Меньшее количество автомобилей на дорогах оказывает благоприятное воздействие на окружающую среду, так как уменьшается количество автомобильных выхлопных газов [8].

Несмотря на различные проявления концепции транзитно-ориентированного развития в разных частях света: умный пост (smart growth), пешеходные районы (walkable communities), неотрадиционные районы (neo-traditional neighborhoods), транзитные деревни (transit villages), развитие, поддерживающее виды общественного транспорта (transit supportive development), желаемые выгоды везде одинаковы. Внедрение ТОР обычно охватывает сразу несколько заинтересованных сторон, включая государственные и местные органы власти, землевладельцев, финансирующие агентства, разработчиков, дизайнеров, инвесторов, агентов по управлению и др.

Типология транзитно-ориентированных зон.

Типология транзитно-ориентированных зон – это способ группировки различных территорий, спроектированных согласно концепции транзитно-ориентированного развития, которые имеют общие характеристики. Характеристики, определяющие типы территорий, могут различаться в зависимости от того, какие результаты ожидаются от применения концепции: транзитно-ориентированные зоны, расположенные на одной территории не будут одинаковыми по своей типологии [9]. Многие города и регионы недавно обратились к типологии как к ключевому инструменту для структурирования краткосрочных и долгосрочных инвестиций в пешеходные районы. Типология транспортно-ориентированных зон предоставляет возможности для классификации и дифференциации многих территорий, направленных на развитие общественного транспорта, группируя их на основе общих ключевых характеристик [10]. Таким образом, данная типология является полезным инструментом, поскольку повышает понимание характеристик,

которые устанавливают измеримые показатели производительности, и обеспечивают основу для повышения эффективности использования территории. Широкая варьированность показателей позволяет определять места, требующие различных стратегий и подходов для стимулирования роста транзитно-ориентированных районов. Эти стратегии часто можно выделить с помощью идентификации ключевых тем и стратегических решений, которые применяются во многих местах при реализации ТОР. Типология транзитно-ориентированных зон классифицирует территории вокруг транспортных узлов и транзитные коридоры в соответствии с готовностью рынка и факторами городской среды, которые, как известно, влияют на развитие транспортного узла. Цель разработки типологии – сохранение ее простоты, информативности, точности и полезности. Типология основана исключительно на существующих условиях, а не на прогнозах или планах [11].

Контекстно-зависимые типы транзитно-ориентированных территорий разработаны с учетом локальных различий и поддержки политиков, планировщиков, разработчиков и дизайнеров. Контекстно-зависимые типы транзитно-ориентированных территорий разработаны на основе следующих четырех предположений [12]:

1. Сходства в рамках одного типа могут позволить планировщикам городов, транспортным инженерам и политикам разработать более целенаправленный набор стратегий по содействию ТОР.

2. Каждый тип транспортного узла имеет набор морфологических характеристик (например, количество направлений от одной узла, плотность улиц в пределах площади транспортного узла и др.) и функциональные характеристики (например, функциональный состав / разнообразие экономических субъектов в районе транспортного узла), которые могут помочь ответить на вопросы планирования. Сюда могут входить такие вопросы, как, например, количество мест для пригородных служб, должны ли быть перемещены рабочие места и жилье, чтобы наилучшим образом использовать транспортный узел, и др.

3. Классификация транзитно-ориентированных зон позволяет местным органам власти и разработчикам наиболее правильно инвестировать каждый тип ТОР для достижения лучшего результата в регионе.

4. Типология, основанная на контексте, в результате анализа различных типов ТОР, позволяет политикам лучше понимать взаимоотношения между ТОР и городскими проблемами района.

В истории градостроительства можно найти огромное количество перспективных, но так и не реализованных идей, в связи с тем, что они не смогли оправдать своих целей. Стратегия ТОР основана на теории, согласно которой использование территории вокруг транспортного узла приведет к другому шаблону передвижения горожан, чем автомобиле-ориентированное использование территории. Поэтому существует множество попыток разработать типологию ТОР. Питер Калтроп утверждал, что транзитно-ориентированное развитие может быть двух видов: «городской тип ТОР» и «районный тип ТОР» [13].

Городской тип ТОР основывается на сети магистральных линий с железнодорожными остановками или на экспресс-автобусах, как прилегающих к основной оси региональной транзитной системы, такой тип ТОР способен генерировать более высокий процент рабочих мест и может развиваться при высоком уровне коммерческой и деловой занятости, а также высокой плотности населения [18].

Районный тип ТОР основывается на регулярных автобусных маршрутах с малым интервалом пути следования. Этот тип ТОР обслуживает жилые районы и комплексы, а также местные коммерческие зоны.

Существует и другая топология, основанная на методе формирования ТОР, которая представлена тремя формами [14] (рис. 1).

1. **Одноуловой тип ТОР:** этот тип присущ одному району, основан вокруг крупных железнодорожных станций. Развитие происходит по круговой схеме, расходящейся от железнодорожной станции. Радиус варьируется от 0,5 км в США (для обеспечения пешеходной доступности) до 2–3 км в Нидерландах (где доступ к велосипеду более распространен).

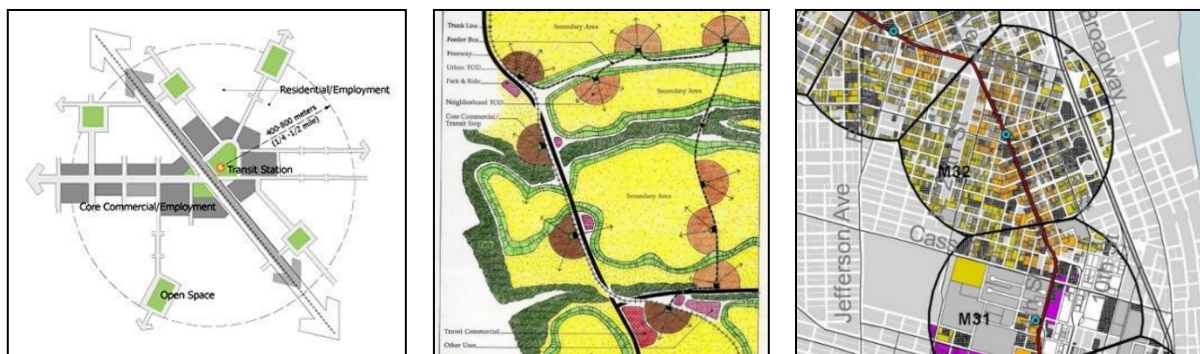
2. **Многоуловой тип ТОР:** этот тип похож на одноуловой тип, но он охватывает более одного района. Узлы могут быть круглыми или полукруглыми. Этот тип ТОР нацелен на перегруппировку целых городских регионов вокруг железнодорожного транспорта.

3. **ТОР коридорного типа:** этот тип встречается в городских районах и основан на остановках легко рельсового транспорта или автобусного экспресса (Bus Rapid Transit). Расположение узлов в таком типе линейно вдоль транзитной линии, поскольку узлы (например, вокруг остановки трамвая) находятся рядом с соседними. Данный тип применим к существующим или планируемым городским районам.

Некоторые транспортные узлы расположены в оживленном центре города, например, в центре региональной экономики; другие распо-

ложены в жилых кварталах, где транзит обеспечивает удобное средство передвижения для поездов жителей на работу, а также до места проведения досуга. Некоторые станции расположены в быстрорастущих и бастроизменяющихся районах, в то время как другие расположены там, где изменения менее быстрые. Станции каждого района, существующие и планируемые, сталкиваются с уникальным набором проблем, требую-

щих индивидуального подхода для создания высококачественной городской среды. Тем не менее, часто в разных районах многие станции имеют аналогичные характеристики. Эти сходства могут помочь планировщикам, гражданам и избранным должностным лицам быстро и легко понять основные соображения планирования и ожидания в отношении характера, роли и функций различных типов мест.



а – одноузловой тип TOP

б – многоузловой тип TOP

с – TOP коридорного типа

Рис. 1. Типы TOP по методу формирования

Существует классификация территорий вокруг транспортных узлов в соответствии с условиями расположения узла: в условиях городской

среды и в условиях пригородной среды. Два вида среды и их характеристики описаны в таблице 1 [15]:

Таблица 1

Типология территорий вокруг транспортных узлов в соответствии с условиями их расположения

№	Характеристика	В условиях городской среды	В условиях пригородной среды
1	Плотность	Высокая плотность	Плотность может сильно различаться, но, как правило, от умеренной до низкой
2	Функциональное использование	Смешанное использование (коммерческое, офисное, жилищное, гостиничное, медицинское и другие)	Низкое смешанное функциональное использование
3	Расстояния	Короткие (в пределах 0,4 – 0,8 км)	Расположены в крупных центрах загородной деятельности или вблизи них, таких как офисный комплекс или торговый центр
4	Транспортное обслуживание	Как правило, обслуживается сеткой улиц с блоками одинакового размера	Как правило, здания разбросаны и обслуживаются плоскостными автостоянками, большими артериальными автострадами в дополнение к общественному транспорту
5	Способ формирования	Система циркуляции с малыми размерами блоков и непрерывными тротуарами, благоприятствует пешеходному передвижению	Учитывая характер пригородной среды, обычно существует большая гибкость при проектировании и сборке больших участков земли
6	Способы передвижения	Станции центра города могут находиться в сближении с несколькими транзитными коридорами, а пассажирские перевозки являются основным видом деятельности	Частота соединения локальных улиц обычно непоследовательна или может полностью отсутствовать, пешеходное передвижение практически невозможно
7	Возможности развития	Возможности развития, заключаются в заполнении, блоков сетки в существующей среде или перепланировке более крупных площадей	Возможности развития включают в себя заполнение, перепланировку новых участков
8	Парковка	Без плоскостных парковок	Большое количество плоскостных наземных парковок

Другие авторы пытались классифицировать ТОР на различных уровнях в зависимости от расположения территории, с целью определения соответствующих показателей эффективности

(табл. 2) [16]. ТОР классифицируются относительно местоположения, размера и типа транзита.

Таблица 2

Характеристики ТОР территорий в зависимости от расположения

Тип ТОР	Желаемое функциональное использование	Минимальная плотность жилых единиц	Типы жилья	Масштаб	Связь с региональным центром	Тип транзита	Частота транзита
Городской центр	Офисные центры, городские развлечения, многоквартирные жилые дома, торговля	> 148 единиц жилья / Га	Многokвартирные дома	Крупный	Центр радиальной системы	Все типы	< 10 минут
Городское соседство	Жилье, торговля и коммерческие помещения	> 50 единиц жилья / Га	Многokвартирные дома, таунхаусы, индивидуальные жилые дома	Средний	Средний доступ к центру города	Скоростной трамвай, трамвай, выделенный автобусный транспорт	10 минут в пиковое время
Пригородный центр	Офисные центры, городские развлечения, многоквартирные жилые дома, торговля	> 124 единиц жилья / Га	Многokвартирные дома, таунхаусы	Крупный	Высокий доступ к субрегиональному центру	Рельсовый трамвай, выделенный автобусный транспорт, местный автобус, паратранзит	10 – 15 минут в пиковое время
Пригородное соседство	Жилые соседства, розничная торговля, местные офисные точки	> 30 единиц жилья / Га	Многokвартирные дома, таунхаусы, индивидуальные жилые дома	Умеренный	Средний доступ к пригородному центру	Рельсовый трамвай, выделенный автобусный транспорт, местный автобус, паратранзит	20 минут в пиковое время
Пригородная зона ТОР	Жилые соседства, розничная торговля	> 17 единиц жилья / Га	Таунхаусы, индивидуальные жилые дома	Малый	Низкий	местный автобус, паратранзит	25 – 30 минут в пиковое время
Вторичный пригородный центр	Торговый центр, жилые единицы	> 30 единиц жилья / Га	Многokвартирные дома, таунхаусы, индивидуальные жилые дома	Малый	Низкий доступ к центру города	Пригородная железная дорога, выделенный автобусный транспорт	Зависит от спроса

Согласно вышесказанному, ТОР может принимать различные формы и варьироваться от коммерческих и жилых центров, которые составляют сердце центрального делового района города, до компактных, но менее плотных жилых кварталов с некоторыми удобствами или без них. По определению, все типологии ТОР включают в себя услуги общественного транспорта. Они также включают большую плотность, как и сочетание жилья и коммерческих единиц вместе с развитым пешеходной средой. Типы ТОР различаются в зависимости от степени интенсивности их использования, сочетания функций. Транзитно-ориентированная зона – это не один проект, а компиляция проектов. Индивидуально каждый проект может выполнять одну основную функцию, а в целом они обеспечивают необходимые показатели города или района. Не все функции ТОР имеют одинаковую значимость. Площадь ТОР-зоны зависит от общего масштаба или интенсивности развития, подходящего для этого транспортного узла, основанной на функции узла и его доступности из соседних районов. Типология представляет собой основу для определения приоритетов и координации инвестиций, для того чтобы максимально расширить возможности фирм и отраслей промышленности, так же обеспечения доступа рабочих и работодателей к вспомогательным услугам, необходимым для экономического роста. Во многих районах, достаточно небольших инвестиций в инфраструктуру, в других случаях требуются более масштабные инвестиции, поддержка общественности и работодателей чтобы раскрыть экономический потенциал транспортного узла. Типология ТОР – это способ координации инвестиций разных групп, который даёт возможность организациям увидеть положительное влияние, как и на их деятельность, так и на общественность от их собственных действий [17].

Региональные центры являются основными центрами экономической и культурной деятельности в любом регионе, они характеризуются плотной разнообразной застройкой, включающей в себя жилье, предприятия розничной торговли и развлекательной сферы, которые обслуживают региональный рынок. Они обслуживаются разнообразным сочетанием различных видов общественного транспорта, которые поддерживают всю деятельность, в том числе высокую пропускную способность регионального железнодорожного и автобусного транспорта, а также автобусы местного обслуживания. Плотность и интенсивность использования территории обычно выше в радиусе полукилометра, чем в радиусе километра.

Городские центры содержат сочетание жилой, рабочей, торговой и развлекательной функций, как правило, при несколько меньшей плотности и интенсивности использования территории, чем в региональных центрах. Направления привлекают жителей из близлежащих районов. Эти центры служат в качестве пригородных узлов для более крупного региона и обслуживаются несколькими вариантами транзита, в том числе железнодорожным и высокоскоростным региональным автобусом или автобусным экспрессом (BRT), а также автобусом местного обслуживания. Многие городские центры сохраняют свой исторический характер, сохранив как исторические здания, так и уличные сети.

Пригородные центры содержат сочетание жилой, рабочей, торговой и развлекательной функций, как правило, с интенсивностью, подобной той, которая наблюдается в городских центрах, но ниже, чем в региональных центрах. Пригородные центры могут служить как источником, так и точкой притяжения для пассажиров. Они, как правило, связаны с региональной транзитной сетью и включают в себя сочетание транзитных типов – региональных железнодорожных и автобусных, BRT и местных автобусов с частым обслуживанием. Застройка здесь может быть более новой, чем в городских центрах.

Транзитные городские центры функционируют скорее, как местные центры экономической и общественной деятельности, чем городские или пригородные центры, и они привлекают меньше жителей из остальной части региона. Различные виды общественного транспорта служат транзитным городским центрам, и осуществляют, в основном обслуживание пригородных рабочих мест в регионе. Существует меньше вторичного транзитного обслуживания, чем предыдущих типах развития территорий. Вторичные транзитные линии питают первичные линии, часто с интервалами, предназначенными для облегчения пересадок на первичных транзитных направлениях. Плотность жилья обычно ниже, чем в выше описанных типах, но по-прежнему существует хорошее сочетание как многоквартирных домов, так и индивидуальных жилых домов, а также сочетание розничной торговли, занятость в небольших масштабах и административная функция.

Городские кварталы – это прежде всего жилые районы, которые хорошо связаны с региональными центрами и городскими центрами. Плотность от умеренной до высокой, а жилье обычно смешивается с местной розничной торговлей. Коммерческое использование ограничено малыми предприятиями или какой-либо от-

раслю. Застройка обычно ориентирована на обслуживание вторичной транзитной сетью. Транзит часто менее ориентирован на деятельность, чем на «центральные» типы мест, а станции мо-

гут располагаться на краю двух отдельных кварталов. Плотность обычно выше, чем непосредственно на первичных транзитных станциях, но распространяется более равномерно в радиусе километра.

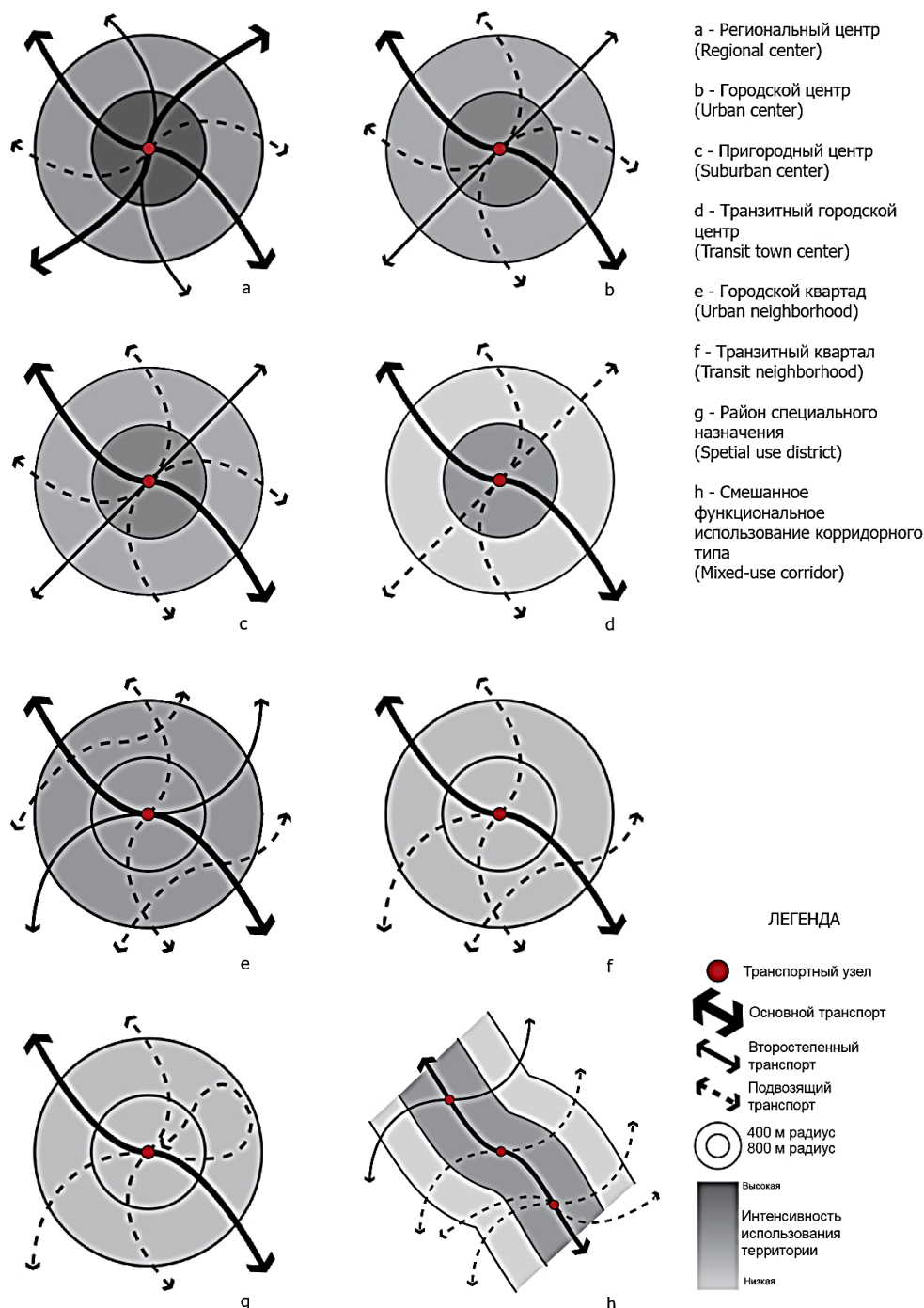


Рис. 2. Формообразование типов TOP

Транзитные кварталы – это прежде всего жилые районы, обслуживаемые железнодорожным транспортом. Плотность от низкой до умеренной, а экономическая активность не сосредоточена вокруг станций, которые могут располагаться на краю двух отдельных кварталов. Вторичное транзитное обслуживание реже и менее

хорошо связано. Часто не хватает жилой плотности для поддержки местной розничной торговли, но часто есть узлы розничной торговли. Транзитные кварталы могут предложить значительные возможности для развития, с возможностью предоставить жителям больше возможностей для жилья, торговли и занятости, как в городских

кварталах. Плотности обычно равномерно распределяются в радиусе километра вокруг транспортных узлов.

Районы специального назначения часто являются центрами занятости с низкой до умеренной плотностью, либо ориентированы на крупное учреждение, такое как университет, или место для развлечений, такое как стадион. Транспортные узлы не являются объектом экономической деятельности. Вторичное транзитное обслуживание нечасто и сосредоточено на станциях; застройка имеет тенденцию быть более поздней, и сетка улиц может быть менее связана, чем в более старых кварталах. Могут быть значительные возможности для развития, если такие станции хорошо связаны с другими районами региона, и существует потребность в жилье. Плотность обычно распределяется равномерно по радиусу километра вокруг станций.

Коридоры смешанного использования являются объектом экономической и общественной деятельности, но не имеют четкого центра. Эти коридоры обычно характеризуются сочетанием зданий с умеренной плотностью, в которых размещаются услуги, розничная торговля, занятость, административная и культурная функции. Коридоры смешанного использования особенно подходят для высококачественного транзитного обслуживания с близко расположенными остановками. Жилая застройка обычно характеризуется более плотным развитием вдоль коридора, с более старыми домами с низкой плотностью, расположенными недалеко от главной артерии. Коридоры смешанного использования иногда обслуживаются транзитными станциями, которые создают узлы деятельности, но они менее отчетливы, чем в других типах развития, и они обслуживаются сетями вторичного транзита, такими как местный автобус (рис. 2).

Вывод: Типология ТОР является мощным инструментом, помогающим градостроителям, лицам, принимающим решения, и заинтересованным сторонам определять приоритеты в инвестициях для разных сообществ, а также определять сроки и масштаб этих инвестиций. Типология ТОР — это мощный динамический инструмент, подкрепляемый региональными данными, регулярно обновляющимися с течением времени, позволяющий разрабатывать индивидуальный подход для конкретных типов транспортных узлов и коридоров. Хотя типология ТОР и инвестиционная структура специально предназначены для обеспечения развития программы ТОР, важно отметить, что программу ТОР следует рассматривать только как один из компонентов комплексного пакета инструментов для реализации эффективной городской структуры.

Типология отражает не только местоположение, функциональное использование и интенсивность использования территории, выраженной через плотность застройки, но и способы перемещения населения. Широко варьирующиеся характеристики помогают определять места, требующие индивидуальных подходов, которые используются для стимулирования роста транзитно-ориентированных районов, и как следствие усиливают существующие активы и доходы района. Их часто можно выделить с помощью инструмента типологии, который определяет ключевые темы и стратегические решения, используемые во многих местах при внедрении ТОР и предоставляет средства для классификации и дифференциации многих богатых транзитом сообществ по всему региону, группируя их на основе ключевых общих характеристик, таких как (плотность, смешивание функций и т. д.). Типология ТОР содержит несколько комбинаций типов узлов, и все области внутри одной комбинации имеют некоторые общие элементы. Категоризация ТОР в типологии значительно расширяет их планирование и проектирование. Например, сходство в пределах типа позволяет политикам и заинтересованным сторонам создать общие стратегии для планирования или для повышения оптимальной интенсивности использования территории. Классификация также поддерживает идентификацию общих потенциалов развития целых классов. Каждый тип ТОР имеет требуемую плотность, систему функционального использования, возможности соединения с существующей транспортной инфраструктурой, поэтому различные типы ТОР-зон поддерживают проектирование оптимальной застройки в конкретном взятом районе. Таким образом, типология помогает ответить на такие вопросы, как: какое соотношение функций будет наиболее эффективно оптимизировать использование территории в конкретных условиях (например, в областях с разной степенью плотности), и в какой степени территория нуждается в обслуживании общественным транспортом? Ответы на эти вопросы особенно важны для эффективного планирования и проектирования ТОР. Например, повышенная плотность имеет потенциал для увеличения количества пассажиров, но в то же время ухудшает социальную справедливость и качество жизни. В связи с этим баланс между этими факторами важен для успешного развития зон, ориентированных на общественные виды транспорта. Классификация также снижает сложность управления территориями, позволяя применять стандарты в операциях и развитии и обеспечивать согласованность действий в крупных географических регионах. Аналогичным образом, она

позволяет идентифицировать места и участников с сопоставимыми проблемами или опытом для пространственного планирования, выявления успешных контрольных показателей или потребности в действиях. Без контрольного показателя невозможно судить о качестве TOP.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kamruzzaman M., Baker D. and Turrell G. Do dissonants in transit oriented development adjust commuting travel behaviour? // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2015. 15(1). Pp. 66–77.
2. Calthorpe P. The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream. 1993: Princeton architectural press. P. 65.
3. Parker T., Arrington M.M.G., Smith-Heimer J. Statewide Transit-Oriented Development Study: Factors for success in California-final report. 2002, BUSINESS, TRANSPORTATION and HOUSING AGENCY & CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. P. 3.
4. Jabareen Y.R. Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts // Journal of planning education and research. 2006. 26(1). Pp. 38-52.
5. Cervero R., Ferrell C., Murphy S. Transit-oriented development and joint development in the United States: A literature review. TCRP research results digest. 2002. Vol. 52. P. 73.
6. Hawaii A.P.A., Committee H.T. Transit and transit oriented development. 2007. P. 67.
7. Li C.N., Lai T.Y. Sustainable Development and Transit-Oriented Development Cities in Taiwan. in The 12th Annual International Sustainable Development Research Conference. 2006. P. 6.
8. Arrington G., Cervero R. TCRP Report 128: Effects of TOD on Housing, Parking, and Travel. Transportation Research Board of the National Academies. Washington. DC. 2008. 3. P. 37.
9. Austin M. et al. Performance-Based Transit-Oriented Development Typology Guidebook. 2010, The Center for Transit-Oriented Development (CTOD). P. 63.
10. Thorne-Lyman A. et al. Transit-Oriented Development Strategic Plan. Center on Transit-Oriented Development. 2011. P. 30.
11. Commission A.C.T., Final Alameda County Priority Development Area Investment and Growth Strategy. 2013, Alameda County Transportation Commission. P. 3.
12. Lyu G., Bertolini L., and Pfeffer K., Developing a TOD typology for Beijing metro station areas // Journal of Transport Geography. 2016. Vol. 55. Pp. 40–50.
13. Calthorpe P. Transit oriented development design guidelines. Calthorpe Association, 1990. P. 5.
14. Smaas L. et al. Transit oriented development and sustainable urban planning, in CASUAL - Co-creating Attractive and Sustainable Urban Areas and Lifestyles. Joint Programming Initiative Urban Europe. 2016. P. 2.
15. Transit D.A.R. Transit-Oriented Development (TOD) Guidelines: Promoting TOD Around DART Transit Facilities. DART Economic Development. 2008. P. 82.
16. Dittmar H., Ohland G. The new transit town: best practices in transit-oriented development. 2004. Washington, D.C. London: Island. P. 60.
17. Sadler B., Wampler E. A station area typology of economic opportunity: A guide to better connecting transit, jobs and workforce development in the Denver Region. 2013. P. 12.
18. Иванькина Н.А., Пьеркова М.В. Концепции нового урбанизма: предпосылки развития и основные положения // Вестник БГТУ им. Шухова. №8. 2018. С. 75–85.

Информация об авторах

Аль-Джабери Ахмед Абдулсалам Ханаш, аспирант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: ahmeda.hanash@uokufa.edu.iq. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Пьеркова Маргарита Викторовна, кандидат архитектуры наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Иванькина Наталия Андреевна, ассистент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: nataliya.ivankina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Аль-Савафи Мохаммед Хасан, аспирант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: Abokhargima@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова д. 46.

Поступила в февраль 2019 г.

©Аль-Джабери А.А.Х., Пьеркова М.В., Иванькина Н.А., Аль-Савафи М.Х., 2019

^{1,*}*Al-Jaberi A.A.H., ¹Perkova M.V., ¹Ivankina N.A., ¹Al-Sawafi M.H.*

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**E-mail: ahmeda.hanash@uokufa.edu.iq*

TYPOLOGY OF TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT

Abstract. *Transit-oriented development (TOD) is a strategy of urban planning that aims to maximize the efficient use of the territory near the transport hub and facilitate the transition to sustainable development of cities and regions. The research is aimed at studying the emergence and development of TOD as part of New Urbanism concept in the history of urban planning and the most important characteristics of TOD. The typology of transit-oriented development plays an important role in urban planning. Its application simplifies the management of infrastructure projects by applying standards in planning and development, as well as ensuring consistency in various areas. In addition, support for planners, administrative staff and developers is of great importance for development, depending on such characteristics as population density, mixing of functions, ways of movement of citizens, activities, etc. The introduction of typology makes it possible to identify the territory and its users with already existing design solutions or experience for more thorough spatial planning.*

Keywords: *urban planning, New Urbanism, Transit-oriented development (TOD).*

REFERENCES

1. Kamruzzaman M., Baker D., Turrell G. Do dissonants in transit oriented development adjust commuting travel behaviour? *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2015. 15(1). Pp. 66–77.
2. Calthorpe P. *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream*. 1993: Princeton architectural press. P. 65.
3. Parker T., M.M.G. Arrington, Smith-Heimer J. *Statewide Transit-Oriented Development Study: Factors for success in California -final report*. 2002, BUSINESS, TRANSPORTATION and HOUSING AGENCY & CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. P. 3.
4. Jabareen Y.R., *Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts*. *Journal of planning education and research*, 2006. Vol. 26(1). Pp. 38–52.
5. Cervero R., Ferrell C., Murphy S. *Transit-oriented development and joint development in the United States: A literature review*. TCRP research results digest. 2002. Vol. 52. P.73.
6. Hawaii A.P.A., Committee H.T., *Transit and transit oriented development*. 2007. P. 67.
7. Li C.-N., Lai T.-Y. *Sustainable Development and Transit-Oriented Development Cities in Taiwan*. in *The 12th Annual International Sustainable Development Research Conference*. 2006. P. 6.
8. Arrington G., Cervero R. *TCRP Report 128: Effects of TOD on Housing, Parking, and Travel*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2008. 3. P. 37
9. Austin M. et al. *Performance-Based Transit-Oriented Development Typology Guidebook*. 2010.
10. Thorne-Lyman A. et al. *Transit-Oriented Development Strategic Plan*. Center on Transit-Oriented Development, 2011. P. 30.
11. Commission A.C.T. *Final Alameda County Priority Development Area Investment and Growth Strategy*. 2013. Alameda County Transportation Commission. P. 3.
12. Lyu G., Bertolini L., Pfeffer K. *Developing a TOD typology for Beijing metro station areas*. *Journal of Transport Geography*, 2016. 55. Pp. 40–50.
13. Calthorpe P. *Transit oriented development design guidelines*. Calthorpe Association, 1990. P.5
14. Smas L. et al. *Transit oriented development and sustainable urban planning*, in *CASUAL - Co-creating Attractive and Sustainable Urban Areas and Lifestyles*. Joint Programming Initiative Urban Europe. 2016. P. 2.
15. Transit D.A.R. *Transit-Oriented Development (TOD) Guidelines: Promoting TOD Around DART Transit Facilities*. DART Economic Development. 2008. P. 82.
16. Dittmar H., Ohland G. *The new transit town: best practices in transit-oriented development*. Washington, DC. London: Island. 2004. P. 60.
17. Sadler B., Wampler E. *A station area typology of economic opportunity: A guide to better connecting transit, jobs and workforce development in the Denver Region*. 2013. P. 12.
18. Ivankina N.A., Perkova M.V. *Concepts of new urbanism: prerequisites for development and basic provisions [Konceptii novogo urbanizma: predposylki razvitiya i osnovnye polozheniya]*. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 8. Pp.75–85. (rus)

Information about the authors

Al-Jaberi, Ahmed Abdulsalam Hanash. Postgraduate. E-mail: ahmeda.hanash@uokufa.edu.iq. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Perkova, Margarita V. Ph.D. Assistant professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ivankina, Nataliya A. Assistant. E-mail: nataliya.ivankina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Al-Sawafi, Mohammed Hasan. Postgraduate. E-mail: Abokharima@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in February 2019

Для цитирования:

Аль-Джабери А.А.Х., Перькова М.В., Иванькина Н.А., Аль-Савафи М.Х. Типология транзитно-ориентированного развития // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 120–130. DOI:10.34031/article_5cd6df47bbe469.43798065

For citation:

Al-Jaberi A.A.H., Perkova M.V., Ivankina N.A., Al-Sawafi M.H. Typology of transit-oriented development. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 120–130. DOI:10.34031/article_5cd6df47bbe469.43798065

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/article_5cd6df45c835e4.80839646

^{1,*}Кожухова Н.И., ¹Данакин Д.Н., ^{1,2}Кожухова М.И., ¹Строкова В.В., ¹Жерновский И.В.,
¹Тесля А.Ю., ¹Алфимова Н.И.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

²Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин
P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США

*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

МОДИФИКАЦИЯ НИЗКОАКТИВНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СИНТЕЗЕ ГЕОПОЛИМЕРОВ

Аннотация. Разработка вяжущих веществ и материалов, характеризующихся многокомпонентностью состава, зачастую обосновано необходимостью улучшения в этих материалах заданных характеристик или обеспечения у них новых свойств.

В рамках данной статьи были синтезированы гибридные геополимеры на основе золы-уноса с использованием разных типов минеральных модифицирующих агентов, таких как портландцемент, каолин и метакаолин. Было установлено, что значения прочности на сжатие, водостойкости водопоглощения для составов на основе портландцемента выше по сравнению с контрольным составом, а также составами, содержащими добавки каолина и метакаолина.

Выявлено, что высокотемпературная обработка (при температуре 600 °С) обеспечивает упрочнение составов вяжущего, содержащих модификатор в виде каолина и метакаолина, а также повышение их показателей водостойкости.

В геополимерных системах, содержащих в своем составе цементный модификатор, наблюдается резкое снижение прочности на сжатие, что сопровождается снижением показателей по плотности. В случае вяжущих систем, не содержащих цементную составляющую при повышении температуры воздействия в диапазоне 400–600 °С происходит резкое увеличение прочности при постоянстве или увеличении плотности. Установлено, что гибридные геополимеры, содержащие портландцемент, не являются термостойкими, что подтверждается резким ухудшением их эксплуатационных характеристик при воздействии высоких температур.

Ключевые слова: золы-уноса, термостойкость, водостойкость, минеральный модификатор, гибридное геополимерное вяжущее.

Введение. Синтез геополимерных вяжущих систем представляет собой процесс химического взаимодействия алюмосиликатного компонента и щелочного активатора, состоящего из оксидов щелочных металлов. В результате большого объема исследований и полученных на их основе экспериментальных данных [1–6], были сформулированы следующие основные критерии эффективности (качества) сырья для получения геополимеров:

- алюмосиликатный состав с соотношением основных оксидов $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в диапазоне 1,5–2,5;
- содержание оксидов щелочноземельных металлов (CaO , MgO) не более 10 %;
- концентрация рентгеноаморфной составляющей (как правило, стеклофазы) в составе алюмосиликата – не менее 50–60 %;
- использование термической сушки для интенсификации процесса консолидации;

– применение солей и гидроксидов щелочных металлов в качестве активатора алюмосиликатного компонента;

Теоретически следовало бы предположить, что использование разных видов сырья, удовлетворяющего выше приведенным критериям, обеспечивает близкие по значению эксплуатационные характеристики.

Однако, практический опыт на примере золы-уноса ТЭС [7–8] показал, что аналогичные по своей сути сырьевые компоненты, подверженные разным условиям твердения, демонстрируют значения по прочности, варьирующиеся в широком диапазоне. Таким образом, потенциальное сырье для геополимеров может быть классифицировано на высоко- и низкоактивное с точки зрения реакционной способности по отношению к щелочному активатору.

Исходя из литературных данных [9–11], геополимерные композиты, получаемые на основе

сырья с высокой реакционной активностью, демонстрируют высокие эксплуатационные (физико-механические) характеристики в широком диапазоне. В то же время, использование низкоактивного сырья чревато формированием у конечных композитов соответствующих низких характеристик, таких как прочность [12], водостойкость [13] и т.д.

На основании выше приведенных данных немаловажно учитывать экономическую целесообразность использования низко активного алюмосиликатного сырья.

В данном случае необходимо обратить внимание на такие факторы как доступность сырья и его запасы (в случае природного) или объемы производства (в случае синтезированного или техногенного); комплексность технологии подготовки сырья; обеспечение уникальных свойств у конечного композита; качество (реакционная активность) и стоимость (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязь между параметрами эффективности материала и целесообразностью его применения

Согласно представленной схеме (рис. 1), для выявления эффективности применения материала, все параметры в верхней части, отвечающие за экономическую эффективность, должны быть сопоставлены с параметром, отвечающим за эксплуатационную эффективность, выраженную, как правило, реакционную активность.

Так, при использовании природного и специально синтезированного сырья, для которого такие параметры как степень ограниченности запасов, стоимость обработки или синтеза и, как следствие, дороговизна, целесообразность применения может быть оправдана либо высокими эксплуатационными показателями, либо приданием конечному композиту уникальных характеристик. В этом случае, использование слабоактивных видов сырья нецелесообразно.

С другой стороны, применение легко доступного дешевого сырья, имеющего довольно

большие запасы, вопросы его практического применения, независимо от его качества, носят иной характер.

Так в случае экономичного и высокоактивного сырья для геополимеров, эффективность его использования очевидна. Однако, если дешевое сырье обладает слабой реакционной активностью или иными низкими характеристиками, то нельзя говорить однозначно о нецелесообразности его применения.

При использовании слабоактивных алюмосиликатов при синтезе геополимеров, могут быть использованы различные модифицирующие добавки, позволяющие повысить качество основного компонента и, как следствие, улучшить эксплуатационные характеристики конечного продукта.

Существует ряд примеров введения дополнительных компонентов в геополимерную систему с целью ее модификации.

Экспериментально доказано, что добавление огнеупорных алюмосиликатных частиц и волокон способствует увеличению термостойкости системы [14–16].

Согласно данным исследований Берналя [17], введение известкового порошка вызывает уплотнение материала в процессе термической обработки.

Кроме того, существует опыт проведения исследований, подтверждающий возможность получения термостойких и огнеупорных геополимерных композиций, например, на основе метакаолина [18–20].

В рамках данной статьи рассмотрены особенности влияния различных видов минеральных модификаторов на реакционную активность алюмосиликатного компонента в условиях высокощелочной активации, а также на морфологию и прочность структуры консолидированных геополимерных систем.

Материалы и методы.

Материалы. Низкокальцевая зола-уноса Новотроицкой ТЭС была использована в качестве основного алюмосиликатного компонента в

гибридных геополимерах. Натр едкий NaOH (чистота – 98 %) был использован в качестве щелочного активатора во всех экспериментальных составах.

Портландцемент СЕМ I42.5N (Белгород, Россия) и каолин месторождения Журавлиный лог (Челябинск, Россия) использовались в качестве модифицирующих компонентов.

Методы. Метакаолин был синтезирован в лабораторных условиях путем предварительной сушки и дальнейшей дегидратации каолина в муфельной печи в течение 2 часов при температуре 800 °С.

Особенности микроструктуры экспериментальных составов были исследованы методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия) в режиме высокого вакуума (InBeam).

Для определения химического состава компонентов был осуществлен рентгено-флуоресцентный анализ с использованием спектрометра ARL9900 WorkStation.

Химический состав золы-уноса и модифицирующих компонентов представлен в таблице 1.

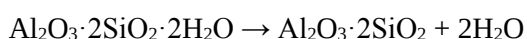
Таблица 1

Химический состав используемых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, % вес.									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	N ₂ O	п.п.п.
Зола-уноса	58,98	28,29	4,63	0,97	0,65	1	3,74	0,36	0,63	6,07
Портландцемент	22,49	4,77	4,4	–	–	0,44	67,22	–	–	0,23
Каолин	53,8	43,4	1,02	0,58	0,56	0,21	0,01	0,06	0,03	
Метакаолин	53,1	42,8	0,7	0,3	0,9	–	0,15	–	0,02	0,4

Экспериментальная часть. Ориентируясь на ранее полученные данные для используемой в данном исследовании золы-уноса Новотроицкой ТЭС и геополимерных систем на ее основе, одни из основных показателей, таких как предел прочности при сжатии, а также водостойкость, являются довольно низкими [13]. Таким образом, выбор используемых минеральных модификаторов обоснован гипотезой улучшения этих характеристик за счет модификации их структуры.

Метакаолин – высокорекреационный, метастабильный продукт дегидратации каолина, полученный обжигом при 650–850 °С в результате реакции дегидроксилирования по следующей реакции:



Метакаолин является промежуточной фазой в цепи температурных трансформаций «каолин –

муллит». При это, необходимо отметить принципиальное различие между метакаолином и шамотом.

Шамот представляет собой смесь глин: огнеупорной и каолиновой, обожженных в температурном диапазоне 1300–1500 °С, представленный в виде спека.

Для проведения исследований были заформованы две серии образцов-кубов размером 2×2×2 см различного состава. Испытания образцов производились в возрасте 7 суток.

Компонентный состав экспериментальных вяжущих представлен таблице 2.

Первая серия образцов была испытана до проведения температурной обработки. Вторая серия образцов была выдержана при температуре 600 °С (рис. 2).

Визуальная оценка термически обработанных экспериментальных составов (рис. 1) показала, что состав 6, состоящий из портландцемента (ПЦ) претерпел значительную деструкцию

в виде раскрытых трещин и увеличения габаритных размеров образца.

Таблица 2

Составы геополимерных вяжущих (% , вес.)

Составы	Зола-уноса	NaOH	Портландцемент	Каолин	Метакаолин
1	40	26,7	33,3	–	–
2	40	26,7	–	33,3	–
3	40	26,7	–	–	33,3
4	40	5	–	95	–
5	–	5	–	–	95
6	–	5	95	–	–
7	95	5	–	–	–

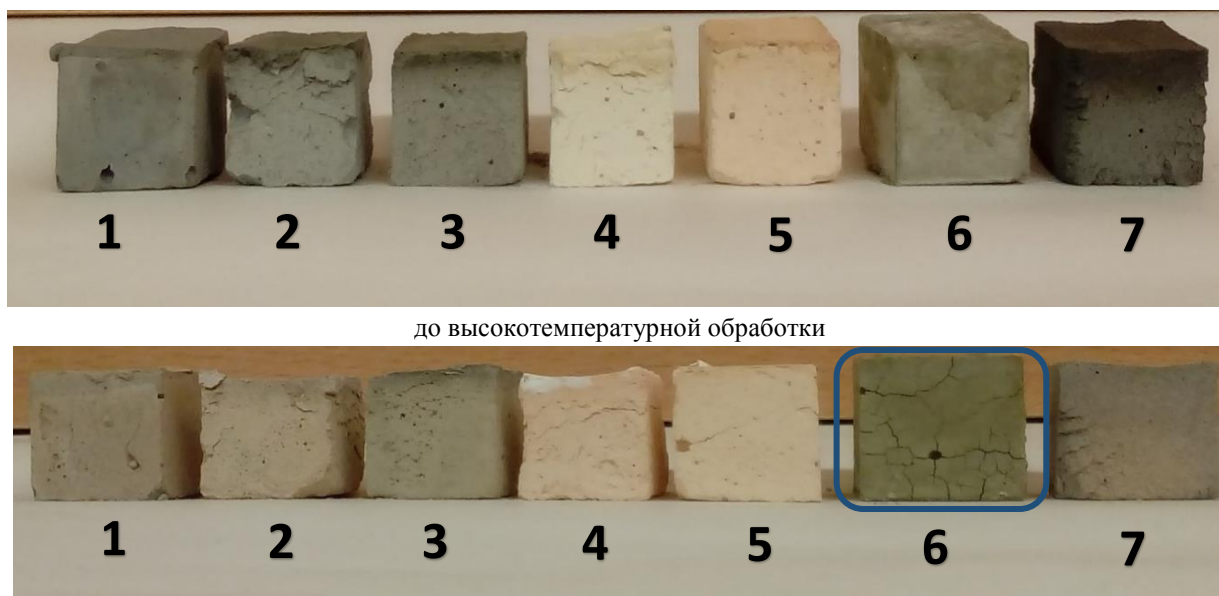


Рис. 2. Внешний вид образцов модифицированных геополимерных вяжущих после высокотемпературной обработки при 600 °С

Для установления влияния модифицирующего агента на устойчивость к воздействию высоких температур, 2 серии (до и после температурной обработки при 600 °С) экспериментальных составов геополимерных вяжущих были испытаны на предел прочности при сжатии, водопоглощение и водостойкость. Водопоглощение определялось согласно ГОСТ 12730.3-78 [14] с использованием формулы (1):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (1)$$

где m_1 – масса высушенного образца, г; m_2 – масса водонасыщенного образца, г.

Водостойкость экспериментальных составов определялась согласно [15] с использованием формулы (2):

$$K_p = \frac{R_{сж2}}{R_{сж1}}, \quad (2)$$

где $R_{сж2}$ – предел прочности при сжатии материала в насыщенном водой состоянии, МПа; $R_{сж1}$ – предел прочности при сжатии материала в сухом состоянии, МПа.

Водостойкими считают материалы, у которых K_p больше 0,8. Полученные результаты представлены в таблице 3.

На основании результатов эксперимента (табл. 3) можно проследить следующие закономерности: составы, содержащие цементную компоненту, после воздействия температуры (600 °С) демонстрируют повышение показателей водопоглощения (от 24 до 35 % для состава 1 и от 5,7 до 35,6 % для состава 2) и снижение водостойкости (от 0,96 до 0,8 для состава 1 и от 1,02 до 0,92 для состава 6). В тоже время, составы 2–5, 7, не содержащие портландцементный модификатор, демонстрируют значительное повышение показателей прочности (до 76 %) и водостойкости (до 80 %), не смотря на повышение показателей водопоглощения.

Для изучения характера влияния высокотемпературного воздействия на прочностные особенности структуры исследуемых геополимерных вяжущих систем, образцы экспериментальных составов были обожжены при различных температурах: 400 °С, 600 °С, 800 °С, а затем испытаны на предел прочности при сжатии (рис. 3).

Таблица 3

Свойства геополимерных вяжущих в зависимости от состава

Состав	Параметры*					
	Предел прочности на сжатие, МПа		Водопоглощение, %		Водостойкость, Кр	
	1	2	1	2	1	2
1	9,81	8,26	24	35	0,96	0,8
2	2,89	4,48	27	34	0,43	0,6
3	3,36	5,94	36	41	0	0,34
4	5,37	7,96	30,6	37	0,82	0,92
5	1,03	1,01	50	1,5	0,59	0,83
6	7,39	1,56	5,7	35,6	1,02	0,92
7	11,1	11,9	28	34	0,43	0,78

*Параметры гибридных геополимерных вяжущих:
 1 – до высокотемпературной обработки
 2 – после высокотемпературной обработки при 600 °С

Согласно характера изменения кривых прочности (рис. 3, а), для составов 1 и 6, содержащих в своем составе ПЦ, в результате высокотемпературного воздействия наблюдается резкое снижение прочности. Это может быть вызвано эффектом от разрушения гидроалюмосиликатных структур цементного камня. Причем, состав 1, в котором значительную долю составляет зола-

уноса, демонстрирует падение прочности только после 600 °С, в то время как состав 6, содержащий только ПЦ, демонстрирует резкое снижение прочности (практически до нулевого значения) уже после 400 °С, что сопровождается резким снижением плотности в этом температурном диапазоне (рис. 3, б). Это подтверждает деструктивные процессы в структуре.

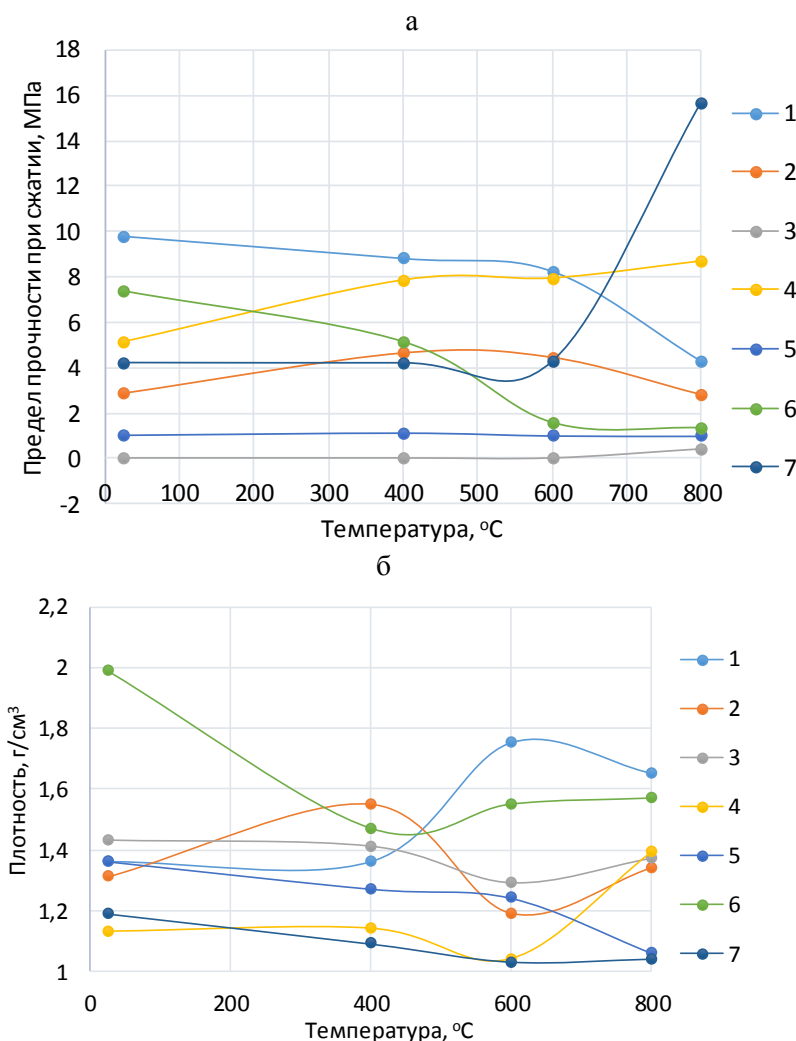


Рис. 3. Характер изменения прочностных (а) и плотностных (б) характеристик геополимерных вяжущих в зависимости от состава и температуры воздействия

Для составов 4 и 7, не содержащих цементный модификатор, наблюдается обратный эффект: для состава 4, имеющего в своем составе каолин повышение температуры сопровождается постепенным ростом прочности и плотности; для состава 7, содержащего только золу-уноса в качестве алюмосиликатного компонента, наблюдается резкий скачок прочности после 600 °С. При этом показатели плотности практически не меняются.

В первом случае, вероятно, происходит одновременно два процесса: дегидроксилирование каолина и его взаимодействие с щелочным активатором по принципу геополимеризации.

Таким образом, удаление воды из системы и образование новых щелочеолюмосиликатных продуктов вызывает повышение показателей плотности и прочности.

В случае состава 7, новообразующиеся продукты геополимеризации равномерно заполняют поры и пустоты, присутствующие в исходной золе-уноса.

Вывод. Анализ физико-механических характеристик, микроструктуры и фазово-минерального состава исследуемых геополимерных систем показал, что их модификация минеральными компонентами, такими как ПЦ, каолин и метакаолин способствует снижению прочности на сжатие, но обеспечивает повышение показателя водостойкости. Высокотемпературная обработка экспериментальных составов, не содержащих ПЦ способствует повышению прочности на сжатие от 7 до 76 %, а также повышению водостойкости до 80 %. Высокотемпературная обработка геополимерного вяжущего, модифицированного ПЦ негативно влияет на прочность и водостойкость из-за деструктивных процессов в матрице вяжущего.

Таким образом, гибридное геополимерное вяжущее, модифицированное ПЦ, является не устойчивым к воздействию высоких температур. Геополимерные вяжущие системы, модифицированные каолином и метакаолином, а также бездобавочное вяжущее (контрольный состав) демонстрируют повышение эксплуатационных показателей прочности и водостойкости под действием высоких температур и являются термически стойкими.

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, Грант Президента для научных школ НШ-2724.2018.8, с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 38–43.
2. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers // International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. № 4. Pp. 309–317.
3. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 123. С. 102–107.
4. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 3rd edition. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France. 2011. 612 p.
5. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Чижов Р.В., Кожухова М.И. Методика оценки реакционной активности алюмосиликатов кислого состава с нанокристаллической структурой // Строительные материалы и изделия. 2019. В печати.
6. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33.
7. Жерновский И.В., Кожухова Н.И. Прогнозная оценка прочности при сжатии геополимерных вяжущих на основе низкокальциевых зол-уноса // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 40–47.
8. Fernández-Jiménez A., De La Torre A., Palomo A., López-Olmo G., Alonso M. M., Aranda M.A.G., Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity // Fuel. 2006. Vol. 85. Pp. 625–634.
9. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461.
10. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062.
11. Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N. and Ogurtsova Yu. N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash // IOP

Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2019. В печати

12. Bernal S.A., Bejarano J., Garzón C., de Gutiérrez R.M., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites // Compos. Part B. 2012. Vol. 43. Pp. 1919–1928.

13. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers // Mater. Des. 2017. 116. Pp. 374–385.

14. ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения. М.: Стандартинформ, 2007.

15. Микульский В.Г. и др. Строительные материалы (Материаловедение, Строительные материалы): учеб. издание. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. 536 с.

16. Sarkar M., Dana K., Das S. Microstructural and phase evolution in metakaolin geopolymers with different activators and added aluminosilicate fillers // J. Mol. Struct. 2015. Vol. 1098. Pp. 1110–1180.

17. Bernal S.A., Rodríguez D.E., de Gutiérrez R.M., Gordillo M., Provis J.L. Mechanical and ther-

mal characterization of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends // J. Mater. Sci. 2011. 46. Pp. 5477–5486.

18. Celerier H., Jouin J., Tessier-Doyen N., Rossignol S. Influence of various metakaolin raw materials on the water and fire resistance of geopolymers prepared in phosphoric acid // Journal of Non-Crystalline Solids. 2018. Vol. 500. P. 493–501

19. Rahier H., Wastiels J., Biesemans M., Willem R., Van Assche G., Van Mele B. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers // Mater. Sci. 2007. Vol. 42. Pp. 2982–2996.

20. Valeria F.F. Barbosa Kenneth J.D. MacKenzie Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate // Materials Research Bulletin. 2003. Vol. 38. Issue 2. Pp. 319–331.

21. Brindley G.W., Nakahira M. The kaolinite–mullite reaction series: I, a survey of outstanding problems // J. Amer. Ceram. Soc. 1959. Vol. 42. № 7. Pp. 311–314.

22. Percival H.J., Duncan J.F., Foster P.K. Interpretation of the kaolinite–mullite reaction sequence from Infrared absorption spectra // J. Amer. Ceram. Soc. 1974. Vol. 57. № 2. Pp. 57–61.

Информация об авторах

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

Данакин Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: danakin93@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Марина Ивановна, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, инженер кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин Р.О. Вох 413, Милуоки, WI 53201, США. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

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

Тесля Анастасия Юрьевна, студент, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: nastya.teslya.96@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жерновский Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: zhernovsky.igor@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в марте 2019 г.

© Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Строкова В.В., Жерновский И.В., Тесля А.Ю., Алфимова Н.И., 2019

^{1,*}Kozhukhova N.I., ¹Danakin D.N., ^{1,2}Kozhukhova M.I., ¹Strokova V.V., ¹Zhernovsky I.V.,
¹Teslya A. Y., ¹Alfimova N.I.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

²University of Wisconsin-Milwaukee
3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA

*E-mail: kozhukhovanata@yandex.ru

MODIFICATION OF LOW-REACTIVE ALUMINOSILICATES AS A METHOD FOR IMPROVEMENT OF ITS QUALITY WHEN GEOPOLYMER SYNTHESIS

Abstract. Synthesis of binders and materials characterized by polycomponent composition, generally, is associated with necessity of improvement of certain properties or formation of principally new characteristics in this materials.

In this paper hybrid geopolymers based on fly ash were synthesized using different types of mineral modifiers such as Portland cement(PC), kaolin, metakaolin (MK). It was defined, that values of compressive strength, water resistance and water absorption for PC-containing geopolymers are better than free of modifier geopolymer as well as for kaolin- and MK-containing geopolymers.

It was determined that high-temperature treatment (at 600 °C) provides with reinforcing and improvement of water resistance of kaolin- and MK-containing hybrid geopolymers.

PC-containing hybrid geopolymers demonstrated a sharp reducing in compressive strength and average density. For this system, in temperature range of 400–600 °C a dramatic growth of compressive strength is observed when average density grows or a constant. Thus, PC-containing hybrid geopolymers are not thermal resistant, that confirmed by degradation of its performance characteristics under high temperature effect.

Keywords: fly ash, thermal resistance, water resistance, mineral modifier, hybrid geopolymer binder.

REFERENCES

1. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Structure formation in alkali activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials with different crystallinity degree [Strukturoobrazovanie v chelocheaktivirovannykh aluminosilikatnykh vyazhuchih system s ispolzovaniem prirodnogo syiria s razlichnoy stepenyu kristallichnosti]. Construction Materials and Products. 2018. Vol.1. №4. Pp. 38–43. (rus)
2. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and Characterization of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysilicate Polymers. International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. № 4. Pp. 309–317.
3. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 123. Pp. 102–107.
4. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 3rd edition. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute. Institut Geopolymere. Saint-Quentin. France. 2011. 612 p.
5. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Chizhov R.V. Chemical reactivity assessment method of nanostructured low calcium aluminosilicates [Metodika otsenki reaktsionnoi aktivnosti nanostrukturirivannykh nizkokaltsievykh aluminosilikatov]. Construction Materials and Products. 2019. In Press. (rus)
6. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33.
7. Zhernovsky I.V., Kozhukhova N.I. Forecast assessment of compressive strength for low-calcium fly ash based geopolymer binders [Prognoznaya otsenka prochnosti pri szhatii geopolimernykh vyazhyshchih na osnove nizkokaltsievykh zol unosa]. Prospect and protection of mineral resources. 2018. No. 12. Pp. 40–47. (rus)
8. Fernández-Jiménez A., De La Torre A., Palomo A., López-Olmo G., Alonso M. M., Aranda M.A.G., Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity. Fuel. 2006. Vol. 85. Pp. 625–634.
9. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461.
10. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062.
11. Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N. and Ogurtsova Yu. N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash. IOP Conf.

Series: Journal of Physics: Conf. Series 2019. In press

12. Bernal S.A., Bejarano J., Garzón C., de Gutiérrez R.M., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. *Compos. Part B*. 2012. Vol. 43. Pp. 1919–1928.

13. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers. *Mater. Des.* 2017. 116. Pp. 374–385.

14. GOST 12730.3-78 Concretes. Method of determination of water absorption. Moscow: Standartinform. 2007. (rus)

15. Mikulsky V.G. etc. Construction materials (Material science, construction materials) [*Stroitel'nye materialy (Materialovedenie, stroitel'nye materialy)*]. Moscow: Izdatelstvo associatsii stroitel'nykh vuzov. 2004. 536 p. (rus)

16. Sarkar M., Dana K., Das S. Microstructural and phase evolution in metakaolin geopolymers with different activators and added aluminosilicate fillers. *J. Mol. Struct.* 2015. Vol. 1098. Pp. 1110–1180.

17. Bernal S.A., Rodríguez D.E., de Gutiérrez R.M., Gordillo M., Provis J.L. Mechanical and ther-

mal characterization of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *J. Mater. Sci.* 2011. 46. Pp. 5477–5486.

18. Celerier H., Jouin J., Tessier-Doyen N., Rossignol S. Influence of various metakaolin raw materials on the water and fire resistance of geopolymers prepared in phosphoric acid. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 500. Pp. 493–501.

19. Rahier H., Wastiels J., Biesemans M., Willem R., Van Assche G., Van Mele B. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. *Mater. Sci.* 2007. Vol. 42. Pp. 2982–2996.

20. Valeria F.F. Barbosa Kenneth J.D. MacKenzie Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials Research Bulletin*. 2003. Vol. 38. Issue 2. Pp. 319–331.

21. Brindley G.W., Nakahira M. The kaolinite–mullite reaction series: I, a survey of outstanding problems. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1959. Vol. 42. No. 7. Pp. 311–314.

22. Percival H.J., Duncan J.F., Foster P.K. Interpretation of the kaolinite–mullite reaction sequence from Infrared absorption spectra. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1974. Vol. 57. No. 2. Pp. 57–61.

Information about the authors

Kozhukhova, Natalia I. PhD, Assistant professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Danakin, Dmitry N. Postgraduate student. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Kozhukhova, Marina I. PhD, Post-Doctoral Associate. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. University of Wisconsin-Milwaukee. 3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Strokova, Valeria V. PhD, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Teslya, Anastasia Y. Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Zhernovsky, Igor V. PhD, Professor. E-mail: zhernovsky.igor@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Alfimova, Natalia I. PhD, Assistant professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received in March 2019

Для цитирования:

Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Строкова В.В., Жерновский И.В., Тесля А.Ю., Алфимова Н.И. Модификация низкоактивного алюмосиликатного сырья как способ повышения его качественных характеристик при синтезе геополимеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 131–139. DOI: 10.34031/article_5cd6df45c835e4.80839646

For citation:

Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Kozhukhova M.I., Strokova V.V., Zhernovsky I.V., Teslya A. Y., Alfimova N.I. Modification of low-reactive aluminosilicates as a method for improvement of its quality when geopolymer synthesis. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 5. Pp. 131–139. DOI: 10.34031/article_5cd6df45c835e4.80839646

DOI: 10.34031/article_5ce292ca4e3828.69724445

¹Кочергин Ю.С., ¹Григоренко Т.И., ^{1,*}Золотарева В.В.¹Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31

*E-mail: viktoria802@gmail.com

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ОЛИГОСУЛЬФОНОВ. ЧАСТЬ 2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Аннотация. В продолжение исследований изучено влияние низкомолекулярных полисульфонов (олигосульфонов) на статические и динамические релаксационные свойства эпоксидных полимеров на основе промышленной смолы ЭД-20. Установлено, что модификация олигосульфонами с концевыми карбоксильными и фенольными группами и молекулярной массой от 1200 до 44500 приводит к формированию эпоксидных систем с более высокой работоспособностью в условиях развития статических процессов ползучести и релаксации механического напряжения. Показано, что динамический модуль сдвига возрастает при введении модификатора. Величина эффекта пропорциональна молекулярной массе олигосульфонов. Интенсивности высокотемпературного α -перехода при 390 К и низкотемпературного β -перехода при 208 К уменьшаются при введении модификатора. Улучшение комплекса релаксационных свойств связано с увеличением плотности химической сетки эпоксидной матрицы при введении модификаторов, насыщением ее более жестким и теплостойким компонентом, а также образованием дополнительных межмолекулярных связей между компонентами системы.

Ключевые слова: эпоксидная смола, отвердитель, олигосульфоны, концевые карбоксильные и фенольные группы, ползучесть, релаксация напряжения, динамический модуль сдвига, тангенс угла механических потерь.

Введение. Расширение областей применения эпоксидных смол ставит задачу создания новых материалов, с большим температурным интервалом работоспособности, улучшенным комплексом эксплуатационных свойств, в частности в условиях развития процессов ползучести и релаксации напряжений. В этой связи значительный научный и практический интерес представляют эпоксидные композиции, модифицированные соединениями, содержащими дифенилсульфоновые фрагменты [1–4]. Объясняется это тем, что группировки $-C_6H_4-SO_2-C_6H_4-$ обладают высокой термической устойчивостью (соединения, содержащие их, разлагаются на воздухе при температуре выше 623 К), а наличие дифенилсульфоновых фрагментов в полимерной цепочке придает полимерам высокую теплостойкость и жесткость. Наглядным примером этого являются ароматические полисульфоны, полисульфоксиды, полисульфонарилаты, полисульфонкарбонаты, полисульфонимиды и ряд других полимеров [5]. Наибольшее практическое значение среди перечисленных полимеров нашли ароматические полисульфоны и полиэфирсульфоны [6–8].

В настоящее время влияние полисульфонов на релаксационные процессы в эпоксидной матрице исследовано явно недостаточно. Имеется ряд публикаций о коротковременных релаксационных процессах, исследованных методом динамической механической спектроскопии [9–11]. В связи с этим нами была предпринята попытка восполнить указанный пробел.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния низкомолекулярных полисульфонов на статические и динамические релаксационные свойства эпоксидных полимеров.

Методология. В качестве объектов исследования выбраны эпоксидные полимеры на основе диглицидилового эфира бисфенола А, которые получали отверждением промышленной смолы марки ЭД-20 с массовой долей эпоксидных групп – не менее 21,4 % и молекулярной массой 410.

Отвердителем служил широко применяемый на практике диэтилентриаминометилфенол марки УП-583Д.

В качестве модификаторов были использованы олигосульфоны (ОСФ) с концевыми карбоксильными и фенольными группами и молекулярной массой (ММ) от 1200 до 44500 (табл. 1). Совмещение олигосульфонов с эпоксидной смолой проводили при 393 К.

$$\delta = \left(\frac{\sum \Delta E_i^*}{N_A \sum \Delta V_i} \right)^{1/2},$$

где ΔE_i – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в величину эффективной мольной энергии когезии; N_A – число Авогадро; ΔV_i – вандерваальсовый объем молекулы, складывающийся из вандерваальсовых объемов составляющих ее атомов.

Таблица 1

Свойства олигосульфонов

Шифр образца	Молекулярная масса	Параметр раст- воримости,* (МДж/м ³) ^{0,5}	Температура размягчения, К	
			в капилляре	термомеханический метод
Б-3-К	1200	20,27	425–431	423
Б-6-К	2500	20,33	431–438	433
Б-10-К	4700	20,42	450–456	451
Б-50-К	22500	20,46	–	466
Б-3-Ф	1480	20,91	427–432	436
Б-30-Ф	13500	20,66	–	463
Б-100-Ф	44500	20,46	–	478

*) Определяли расчетным путем по формуле [12]:

Таблица 2

Влияние добавок олигосульфонов на релаксационные переходы в эпоксидном полимере

Параметр	Исходный эпоксидный полимер	Модификатор ¹⁾	
		Б-6-К	Б-10-К
T _β , К	213	218	227
tg δ _β	0,085	0,073	0,067
T _α , К	387	390/391,07 ²⁾	393/392,76 ²⁾
tg δ _α	0,82	0,66	0,64
G', МПа, при температурах: β-перехода	1259	1445	1738
α-перехода	98	145	170

¹⁾ Содержание модификатора 10 масс.ч.; ²⁾ до черты экспериментальное значение, после черты – расчетное значение.

Отверждение композиций вели без подвода тепла извне: 293 К /240 ч (режим I) и с термообработкой: 293 К/72 ч + 393 К/3 ч (режим II).

Объекты исследования представляли собой пленки толщиной 100–150 мкм, полученные при отверждении полимерных композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытых тонким слоем антиадгезива.

Изучение процесса релаксации напряжения проводили на приборе типа Поляни с жестким динамометром и автоматической регистрацией измеряемых величин [13].

Запись кривых ползучести пленочных образцов проводили на установке [14] при постоянной растягивающей нагрузке. На этой установке также выполняли термомеханические исследования.

Динамические механические свойства (тангенс угла механических потерь tg δ и динамический модуль сдвига G') исследовали на крутильном маятнике МК-1 в температурном диапазоне от 123 до 423 К на образцах размерами 75×10×0,5 мм при частоте колебаний 1 Гц. Температура в

процессе измерения поддерживалась с точностью до ± 1 К.

Основная часть. Как следует из рис. 1 и 2, введение ОСФ в состав эпоксидной композиции способствует замедлению процессов ползучести.

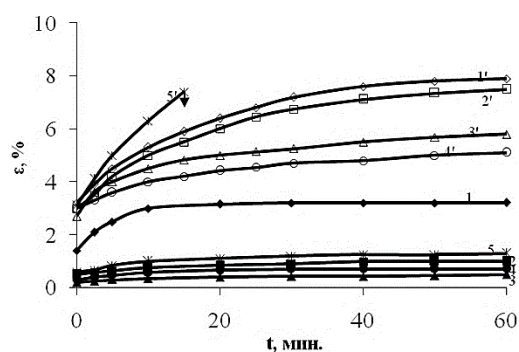


Рис. 1. Кривые ползучести исходного эпоксидного полимера (1, 1') и модифицированного 10 масс. ч. Б-3-К (2, 2'), Б-6-К (3, 3'), Б-10-К (4, 4'), Б-50-К (5, 5'). 1 – 5 – температура испытания (293 ± 2) К; 1' – 5' – температура испытания (333 ± 5) К.

Приложенное напряжение 30 МПа. Образцы отверждены по режиму II

При этом при комнатной температуре величина и скорость ползучести практически не зависят от молекулярной массы и химической природы концевых групп модификаторов. Очевидно, что обнаруженный эффект может быть объяснен формированием более плотной и менее дефектной сетки химических связей в эпоксидной матрице вследствие модификации ее ОСФ.

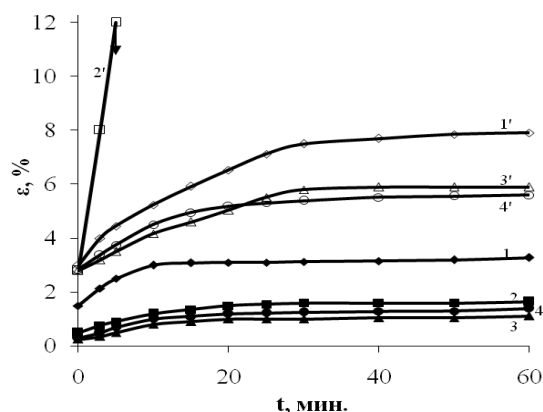


Рис. 2. Кривые ползучести исходного эпоксидного полимера (1, 1') и модифицированного 10 масс. ч. Б-3-Ф (2, 2'), Б-30-Ф (3, 3'), Б-100-Ф (4, 4').
1 – 4 – температура испытания (293 ± 2) К;
1' – 4' – температура испытания (333 ± 5) К.

Приложенное напряжение 30 МПа. Образцы отверждены по режиму II

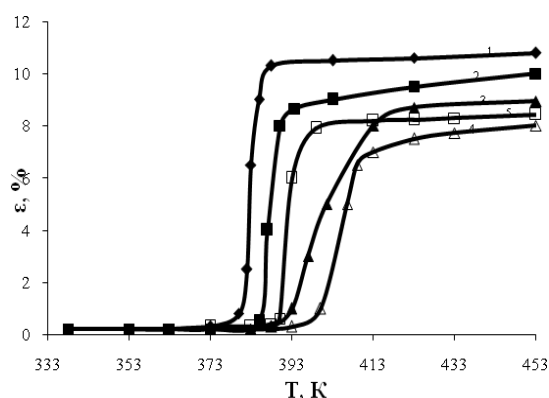


Рис. 3. Термомеханические кривые исходного эпоксидного полимера (1) и модифицированного 10 масс. ч. олигосульфонов Б-3-К (2), Б-6-К (3), Б-10-К (4), Б-50-К (5).
Образцы отверждены по режиму II

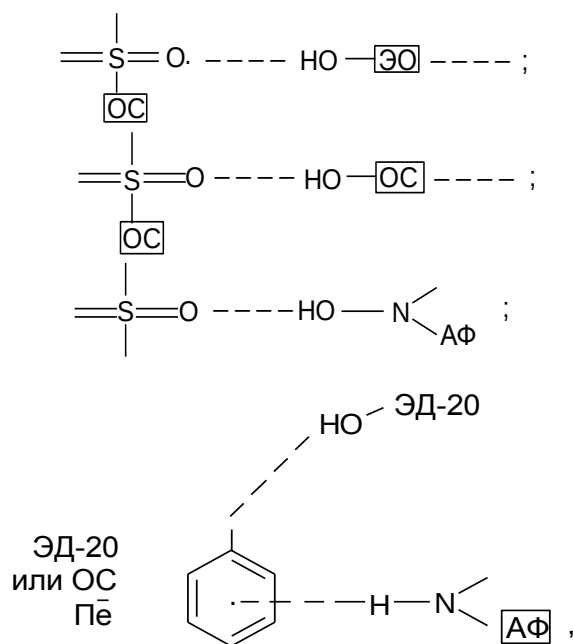
Как видно из рис. 3, введение ОСФ приводит к снижению деформативности образцов в высокоэластическом состоянии ($\varepsilon_{в.э.}$), что указывает на увеличение плотности химической сшивки в эпоксидном полимере, которая, как известно [15], может быть рассчитана по величине равновесной ползучести ε_0 , измеренной при температуре $T = T_c + 50$ К (т.е. при температуре на 50 К

выше температуры стеклования полимера T_c), по формуле:

$$\varepsilon_0 = \sigma_0 / 3RT\varepsilon_0,$$

где σ_0 – постоянное приложенное напряжение; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; ε_0 – равновесная деформация.

Кроме плотности химической сетки, определенный вклад в увеличение жесткости эпоксидной матрицы, а, следовательно, замедление процесса ползучести, должны вносить и дополнительные водородные связи, образующиеся в эпоксиполимере при введении ОСФ, между молекулами олигосульфона, эпоксидного олигомера и отвердителя:



где ОС – олигосульфон; АФ – аминифенольный отвердитель; ЭО – эпоксидный олигомер; --- водородная связь.

Однако при повышенных температурах испытания поведение образцов становится различным. В этом случае скорость и величина ползучести для образцов, содержащих ОСФ с концевыми карбоксильными группами, уменьшается с увеличением ММ олигосульфонов только до 4700. При дальнейшем увеличении ММ модификаторов (продукт Б-50-К) начальная скорость процесса резко возрастает и становится выше, чем у исходной композиции. При этом по истечении сравнительно небольшого времени (~ 15 мин) образец разрушается (рис. 1, кривая 5').

Обратная картина при повышенных температурах испытания наблюдается для ЭП, содержащих ОСФ с концевыми фенольными группами. Если для образца, содержащего Б-3-Ф, резкое ускорение процесса ползучести наблюдается

сразу же после приложения нагрузки, то с увеличением ММ вводимого модификатора скорость и величина деформации уменьшаются даже по сравнению с исходным полимером (рис. 2).

Высокий уровень сохраняемого в образце напряжения (σ_0) – одно из важных требований, предъявляемых к материалам конструкционного назначения. Как показали проведенные исследования, наличие в эпоксидном полимере ОСФ позволяет значительно повысить данный показатель (рис. 4). Как и в случае ползучести, эффект зависит от ММ и природы концевых групп ОСФ. Вначале с ростом ММ σ_0 возрастает, а затем несколько уменьшается. При этом лучшие результаты обеспечивает композиция, модифицированная Б-10-К. Отметим, что хотя при использовании олигосульфонов с ММ > 4700, σ_0 начинает убывать, тем не менее, и в случае композиции, содержащей Б-50-К, ее работоспособность в условиях релаксации напряжения существенно выше, чем у немодифицированного образца.

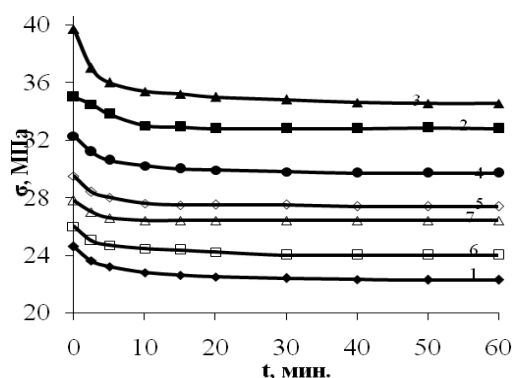


Рис. 4. Кривые релаксации напряжения исходного эпоксидного полимера (1) и модифицированного 10 масс. ч. Б-3-К (2), Б-10-К (3), Б-50-К (4), Б-3-Ф (5), Б-30-Ф (6), Б-100-Ф (7). Образцы отверждены по режиму II

В случае ОСФ с концевыми фенольными группами их введение в состав ЭП только незначительно увеличивает уровень сохраняемого напряжения и эффект не зависит от ММ (рис. 4, кривые 5 – 7).

Исследование влияния концентрации модификатора на процесс релаксации показало, что с увеличением содержания олигосульфона Б-10-К значение σ_0 повышается, достигая максимума при содержании 10 масс. ч. Дальнейший рост концентрации модификатора приводит к снижению σ_0 , однако уровень сохраняемого напряжения все равно остается выше, чем у исходного ЭП.

С помощью крутильного маятника исследовано влияние добавок ОСФ на коротковременные релаксационные процессы. Как следует из

рис. 5, с увеличением молекулярной массы модификатора наблюдается увеличение динамического модуля сдвига G' , т.е. возрастает жесткость композиционного материала.

Что касается интенсивности низкотемпературного β -перехода, обнаруживаемого при $T \sim 208$ К, то, как следует из температурных зависимостей тангенса угла механических потерь (рис. 5а), она уменьшается при введении олигосульфонов и эффект зависит от ММ модификатора. Это может быть связано как с уменьшением доли эпоксидной составляющей в модифицированном полимере, так и с увеличением плотности химической сшивки эпоксидной матрицы и образованием дополнительных межмолекулярных связей (о чем уже упоминалось ранее при обсуждении термомеханических зависимостей), приводящих к затруднению конформационных перегруппировок в области β -перехода. Очевидно, что первая составляющая определяется только количеством добавки, а вторая зависит от ее ММ.

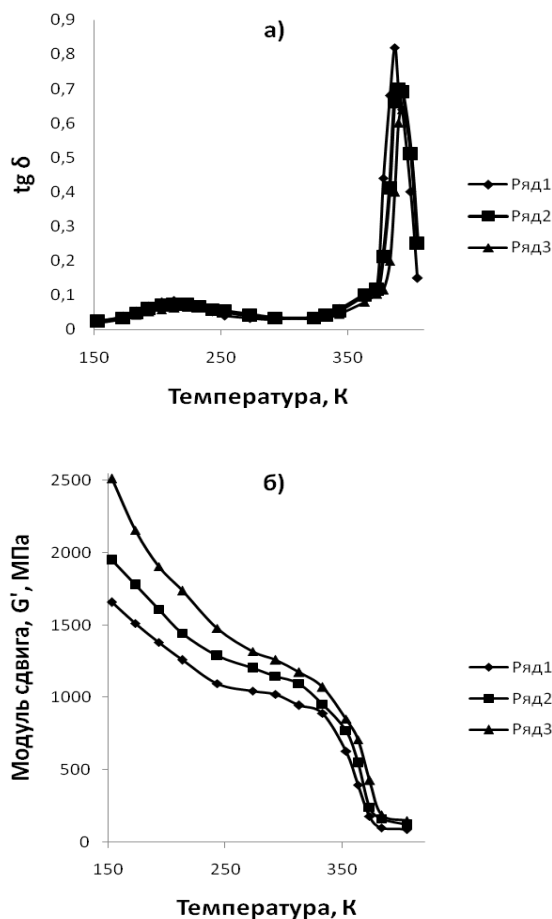


Рис. 5. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь $\text{tg } \delta$ (а) и динамического модуля упругости G' (б) исходного эпоксидного полимера (1) и модифицированного 10 масс. ч. Б-6-К (2) и Б-10-К (3)

Выводы. Таким образом, модификация эпоксидных полимеров олигосульфонами приводит к формированию систем, характеризующихся лучшей работоспособностью в условиях развития процессов ползучести и релаксации механического напряжения. Величина эффекта в большей степени зависит от количества введенного модификатора и его молекулярной массы и в значительно меньшей мере – от природы концевых групп. Улучшение комплекса свойств модифицированных полимеров может быть связано с наложением нескольких эффектов: увеличением плотности химической сетки эпоксидной матрицы при введении модификаторов, насыщением ее компонентом с более высокими жесткостью и теплостойкостью, а также образованием дополнительных межмолекулярных связей между компонентами системы. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование олигосульфонов в качестве модификаторов эпоксидных смол позволяет получать композиционные полимерные материалы конструкционного назначения с более высокой работоспособностью в условиях развития статических релаксационных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 415 с.
2. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров: Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина, М.: Химия, 1976. 415 с.
3. Paluvai N.R., Mohanty S., Nayak S.K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review // Polymer-Plastics Technology and Engineering». 2014. Vol. 53. P. 1723–1758.
4. Зайцев Ю.С., Кочергин Ю.С., Пактер М.К., Кучер Р.В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции. Киев: Наук.думка, 1990. 200 с.
5. Бюллер К.У. Тепло- и термостойкие полимеры. Пер. с нем. М.: Химия, 1984. 1056 с.
6. Сторожук И.П., Валецкий П.М. Закономерности образования и свойства полиарилсульфоноксидов // Химия и технология высокомолекулярных соединений: Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1978. Т.12. С. 127–176.
7. Varley R.J., Hodgkin J.H., Simon G.P. Toughening of a trifunctional epoxy system. Part VI. Structure property relationships of the thermoplastic toughened system // Polymer. 2001. Vol. 42. Pp. 3847–3858.
8. Brooker R.D., Kinloch A.J., Taylor A.C. / The morphology and fracture properties of thermoplastic-toughened epoxy polymers // J. Adhes. 2010. Vol. 86. Pp. 726–741.
9. Rajaswaram R., Alagar M. Mechanical Properties of Bismaleimides Modified Polysulfone Epoxy Matrices // Int. J. Polym. Mater. 2007. Vol. 56. №9. P. 911–927.
10. Yoon T., Kim B.S., Lee D.S. Structure development via reaction-induced phase separation in tetrafunctional epoxy/polysulfone blends // Journal Applied Polymer Science. 1997. Vol. 66. Pp. 2233–2242.
11. Mimura K., Ito H., Fujioka H.. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins // Polymer. 2000. Vol. 41. Pp. 4451–4459.
12. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983. 248 с.
13. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 336 с.
14. Кочергин Ю.С., Аскадский А.А., Салазкин С.Н. и др. Исследование ползучести линейных и сетчатых полимеров на основе полиарилатов и эпоксидных полимеров // Высокомолек. соед. Сер. А. 1978. Т. 20. № 4. С. 880–887.
15. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 296 с.

Информация об авторах

Кочергин Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры общинженерных дисциплин. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Григоренко Татьяна Ильинична, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Золотарева Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров. E-mail: viktoria802@gmail.com. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Поступила в март 2019 г.

© Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В., 2019

¹Kochergin Y.S., ^{1,*}Grigorenko T.I., ¹Zolotareva V.V.¹Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky
Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31

*E-mail: viktoria802@gmail.com

PROPERTIES OF COMPOSITIONAL MATERIALS BASED ON THE MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND OLIGOSULPHONES. PART 2. STATIC AND DYNAMIC RELAXATION PROPERTIES

Abstract. The effect of low-molecular polysulfones (oligosulfones) on the static and dynamic relaxation properties of epoxy polymers based on industrial resin ED-20 is studied. It is established that the modification of oligosulfones with terminal carboxyl, phenolic groups and a molecular weight from 1200 to 44500 leads to the formation of epoxy systems with higher performance in terms of development of static processes of creep and stress relaxation. It is demonstrated that the dynamic shear modulus increases with the introduction of the modifier. The magnitude of this effect is proportional to the molecular weight of oligosulfones. The intensities of the high-temperature α -transition at 390 K and the low-temperature β -transition at 208 K decrease with the introduction of the modifier. The improvement of the relaxation properties is associated with an increase in the density of the chemical grid of the epoxy matrix with the introduction of modifiers, its saturation with more rigid and heat-resistant component and the formation of additional intermolecular bonds between the components of the system.

Keywords: epoxy resin, hardener, oligosulfones, end carboxyl and phenolic groups, creep, stress relaxation, dynamic shear modulus, mechanical loss tangent.

REFERENCES

1. Lee H., Neville K. Handbook of epoxy resins [*Spravochnoe rukovodstvo po epoksidnym smolam*]. Moscow: Energy, 1973, 415 p. (rus)
2. Van Krevelen D. V. Properties of polymers correlations with chemical structure [*Svojstva i himicheskoe stroenie polimerov*]. Trans. from English. Edited by A. Y. Malkin. M.: Chemistry, 1976, 415 p. (rus)
3. Paluvai N.R., Mohanty S., Nayak S.K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2014. Vol. 53. Pp. 1723–1758.
4. Zaitsev Yu.S., Kochergin Yu.S., Pakter M.K., Kucher R.V. Epoxy oligomers and adhesive compositions [*Epoksidnye oligomery i kleeveye kompozicii*]. Kiev: Nauk.Dumka. 1990, 200 p. (rus)
5. Büller K.U. Spezialplaste [*Teplo- i termostojkie polimery*] Trans. with German. M.: Chemistry. 1984. 1056 p. (rus)
6. Storozhuk I.P., Valetsky P.M. Chemistry and technology of high molecular compounds [*Zakonovernosti obrazovaniya i svojstva poliarilensul'fonoksidov*]. Results of science and technology. M.: VINITI, 1978. Vol. 12. Pp. 127–176. (rus)
7. Varley R.J., Hodgkin J.H., Simon G.P. Toughening of a trifunctional epoxy system. Part VI. Structure property relationships of the thermoplastic toughened system. Polymer. 2001. Vol. 42. Pp. 3847–3858.
8. Brooker R.D., Kinloch A.J., Taylor A.C. The morphology and fracture properties of thermoplastic-toughened epoxy polymers. J. Adhes. 2010. Vol. 86. Pp. 726–741.
9. Rajaswaram R., Alagar M. Mechanical Properties of Bismaleimides Modified Polysulfone Epoxy Matrices. Int. J. Polym. Mater. 2007. Vol. 56. No. 9. Pp. 911–927.
10. Yoon T., Kim B.S., Lee D.S. Structure development via reaction-induced phase separation in tetrafunctional epoxy/polysulfone blends. Journal Applied Polymer Science. 1997. Vol. 66. Pp. 2233–2242.
11. Mimura K., Ito H., Fujioka H.. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins. Polymer. 2000. Vol. 41. Pp. 4451–4459.
12. Askadsky A.A., Matveev Yu.I. Chemical structure and physical properties of polymers [*Himicheskoe stroenie i fizicheskie svojstva polimerov*]. M.: Chemistry. 1983, 248 p. (rus)
13. Malkin A.Y., Askadsky A.A., Kovriga V.V. Methods of measurement of mechanical properties of polymers. M.: Chemistry, 1978, 336 p. (rus)
14. Kochergin Yu.S., Askadsky A.A., Salazkin S.N. et al. The study of creep of linear and reticulated polymers based polyarylates and epoxy polymers [*Issledovanie polzuchesti linejnyh i setchatyh polimerov na osnove poliarilatov i epoksidnyh polimerov*]. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A, 1978. Vol. 20. No. 4. Pp. 880–887. (rus)
15. Perepechko I. I. Acoustic methods of polymer research [*Akusticheskie metody issledovaniya polimerov*]. M.: Chemistry. 1973, 296 p. (rus)

Information about the authors

Kochergin, Yuri S. PhD, Professor Department of General Engineering Disciplines. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Grigorenko, Tatyana I. PhD, Senior Researcher. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Zolotareva, Victoriya V. PhD, Assistant professor Department of Commodity Science and Expertise of Non-Food Products. E-mail: viktoria802@gmail.com. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Received in March 2019

Для цитирования:

Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. Свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и олигосульфонов. Часть 2. Статические и динамические релаксационные свойства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 140–146. DOI: 10.34031/article_5ce292ca4e3828.69724445

For citation:

Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Properties of compositional materials based on the mixtures of epoxy polymers and oligosulphones. Part 2. Static and dynamic relaxation properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 140–146. DOI: 10.34031/article_5ce292ca4e3828.69724445

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694

¹Круглова Т.Н., ^{1,*}Власов А.С.¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

*E-mail: sasha-vlasov-1993@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛНОПРИВОДНЫМ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНЫМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Аннотация. Современной тенденцией развития сельского хозяйства является его повсеместная роботизация. В настоящее время активно внедряются различные конструкции роботов, призванные заменить человека при выполнении различных задач. Большинство из этих роботов представляют собой колесную мобильную платформу, для которой необходимо обеспечить высокую маневренность и точность управления. Решить эту задачу можно с помощью разработки оптимальных высокоточных алгоритмов управления, для исследования которых целесообразно использовать математическую модель мобильно сельскохозяйственного робота. В данной статье приведены результаты моделирования движения четырехколесного полноприводного мобильного робота с дифференциальным приводом, который перемещается по полю прямоугольной формы по траектории «змейка», которая является оптимальной по быстродействию.

Ключевые слова: сельскохозяйственный мобильный робот, дифференциальный привод, математическое моделирование, алгоритмы управления.

Введение. В настоящее время мобильные роботы нашли широкое применение в различных областях человеческой жизни. Наиболее часто применяются трех [1–3] и четырех колесные роботы, имеющие различные типы приводов колес. Наиболее универсальными и применимыми для нужд сельского хозяйства являются роботы с дифференциальным приводом. Известно достаточное количество научных работ, рассматривающих вопросы управления такими роботами с контролем угла поворота [4,5], но без конкретного заданного маршрута, что весьма актуально при проектировании адаптивных роботизированных систем в сельском хозяйстве. Разработка высокоточных алгоритмов планирования маршрута и управления мобильным роботом позволит обеспечить максимальную производительность сельскохозяйственной техники, а также минимизировать потребление энергоресурсов.

Также существуют разработки математических моделей для формирования траектории и планирования пути [6], где определение местоположения мобильного робота играет важную роль в обеспечении быстрого и плавного отслеживания перемещений. Для достижения поставленной цели целесообразно использовать специализированный контроллер, основанный на методах обратного шага и подхода Ляпунова [7]. Для разработки высокоточной мехатронной системы [8] с оптимизацией производительности целесообразно выполнить разработку и исследование

имитационной модели планирования и формирования траектории перемещения мобильного робота. В данной статье представлены результаты по разработке алгоритма управления в составе полноприводного мобильного робота с дифференциальным приводом. Предложенная модель может быть модифицирована для включения любой другой стратегии управления или кинематики.

Методика. Рассмотрим кинематическую модель четырехколесного полноприводного робота (рис.1) нашедшего наиболее широкое применение для нужд сельского хозяйства. Такой робот использует все четыре колеса для движения:

- V_L – левое переднее колесо, линейная скорость которого обозначена как V_{BL} ;
- V_R – правое переднее колесо, линейная скорость которого обозначена как V_{BR} ;
- A_L – левое заднее колесо, линейная скорость которого обозначена как V_{AL} ;
- A_R – правое заднее колесо, линейная скорость которого обозначена как V_{AR} .

Так как мобильный робот оснащен дифференциальным приводом, контроль маневрирования устройства осуществляется путем увеличения или уменьшения скорости на одном из двигателей [9]. Следовательно, для четырехколесного мобильного робота, в отличие от трехколесного, линейная скорость левого (1) и правого привода (2) будет выглядеть:

$$V_L = \frac{V_{BL} + V_{AL}}{2} \quad (1)$$

$$V_R = \frac{V_{BR} + V_{AR}}{2} \quad (2)$$

Таким образом управление будет осуществляться, используя полный привод мобильного робота. Теперь рассмотрим алгоритм управления данным устройством, который движется по траектории «змейка» (рис. 2).

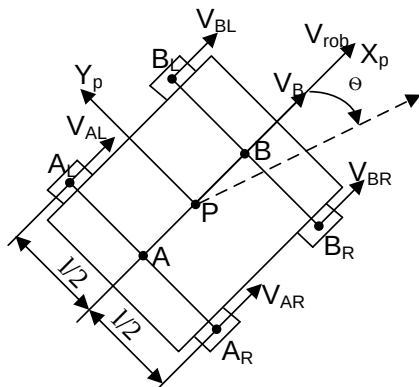


Рис. 1. Кинематическая схема полноприводного четырехколесного мобильного робота

Разработка алгоритма проводилась с учетом вышеизложенного метода управления и кинематики мобильного робота. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма для одного цикла движения по траектории типа «змейка». Когда мобильный робот находится в начальном положении рабочей области, начинается движение вперед с заданной скоростью с условием что $V_L = V_R$. Затем после достижения правой границы поля следует развернуть устройство на угол равный 180 градусов (левый поворот) относительно положения при прямолинейном движении и на расстояние равное ширине робота. Когда заданный угол достигнут, необходимо продолжать прямолинейное движение до левой границы поля, где мобильный робот должен совершить правый поворот тем самым угол поворота должен принять значение 0 градусов, приняв исходное положение, но с координатой Y равной $2 \cdot L$. Затем следует произвести прямолинейное движение до правой границы поля для расчета ошибки позиционирования мобильного робота и степени отклонения угла поворота от заданного курса.

Управление роботом осуществляется с помощью контроля скорости колес [10] (рис.1), приводящихся в движение двигателями постоянного тока с независимым возбуждением, математическая модель которых имеет следующий вид (3):

$$\begin{aligned} \frac{dI_a}{dt} &= \frac{U - c \cdot w_d - I_a \cdot R}{L} \\ \frac{dw_d}{dt} &= \frac{c \cdot I_a - M_c}{J}, \end{aligned} \quad (3)$$

где U – напряжение на двигателе; c – электро-механическая постоянная двигателя; I_a – ток якоря; R – сопротивление обмотки якоря; J – момент инерции двигателя; M_c – момент статической нагрузки на двигатель; w_d – угловая скорость двигателя.

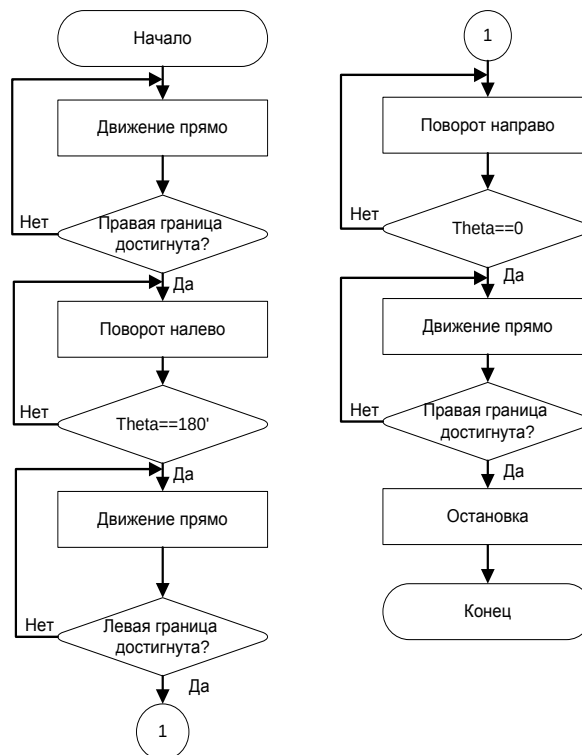


Рис. 2. Блок-схема алгоритма для движения по траектории «змейка»

Тогда математическая модель левого дифференциального привода [11] может быть записана согласно (4):

$$\begin{cases} \frac{dI_{aBL}}{dt} = \frac{U_1 - c \cdot w_{BL} - I_{aBL} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{BL}}{dt} = \frac{c \cdot I_{aBL} - M_c}{J} \\ \frac{dI_{aAL}}{dt} = \frac{U_2 - c \cdot w_{AL} - I_{aAL} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{AL}}{dt} = \frac{c \cdot I_{aAL} - M_c}{J} \\ V_L = \frac{w_{BL} \cdot r + w_{AL} \cdot r}{2} \end{cases} \quad (4)$$

где w_{BL}, w_{AL} – угловая скорость левого переднего и заднего колеса соответственно; I_{aBL}, I_{aAL} – ток якоря левого переднего и заднего двигателя соответственно. Для правого привода система дифференциальных уравнений будет выглядеть аналогично.

Кинематическая модель мобильного робота [12] имеет следующий вид (5):

$$\begin{cases} \frac{dX_p}{dt} = \left(\frac{V_L + V_R}{2} \right) \sin(\theta) + x_0 \\ \frac{dY_p}{dt} = \left(\frac{V_L + V_R}{2} \right) \cos(\theta) + y_0 \\ \frac{d\theta_{rob}}{dt} = \left(\frac{V_R - V_L}{L} \right) + \theta_0 \end{cases} \quad (5)$$

где X_P – координата X; Y_P – координата Y; V_{BR}, V_{BL} – линейные скорости правого и левого привода мобильного робота; L – ширина мобильного робота; θ – угол поворота мобильного робота; $[x_0, y_0]$ – начальные координаты, которые равны $[0, 0]$.

Объединив системы дифференциальных уравнений 4 и 5, получим математическую модель вида (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{BL}}{dt} = \frac{U_1 - c \cdot w_{BL} - I_{BL} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{BL}}{dt} = \frac{c \cdot I_{BL} - M_c}{J} \\ \frac{dI_{AL}}{dt} = \frac{U_2 - c \cdot w_{AL} - I_{AL} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{AL}}{dt} = \frac{c \cdot I_{AL} - M_c}{J} \\ V_L = \frac{w_{BL} \cdot r + w_{AL} \cdot r}{2} \\ \frac{dI_{BR}}{dt} = \frac{U_1 - c \cdot w_{BR} - I_{BR} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{BR}}{dt} = \frac{c \cdot I_{BR} - M_c}{J} \\ \frac{dI_{AR}}{dt} = \frac{U_2 - c \cdot w_{AR} - I_{AR} \cdot R}{L} \\ \frac{dw_{AR}}{dt} = \frac{c \cdot I_{AR} - M_c}{J} \\ V_R = \frac{w_{BR} \cdot r + w_{AR} \cdot r}{2} \\ \frac{dX_P}{dt} = \left(\frac{V_L + V_R}{2} \right) \sin(\theta) + x_0 \\ \frac{dY_P}{dt} = \left(\frac{V_L + V_R}{2} \right) \cos(\theta) + y_0 \\ \frac{d\theta_{rob}}{dt} = \left(\frac{V_R - V_L}{L} \right) + \theta_0 \end{array} \right. \quad (6)$$

где I_{BR} и I_{AR} – ток правого переднего и заднего двигателя соответственно, w_{BR} и w_{AR} – угловая скорость правого переднего и заднего привода соответственно, L – ширина робота.

Проведение исследований на разработанной модели. Для исследования данной модели, разработана имитационная модель полноприводного мобильного робота с дифференциальным приводом в пакете Simulink Matlab [13–15] (рис. 3), которая состоит из следующих блоков:

1) **Algorithm** – блок, в котором реализуется управление мобильным роботом по траектории

змейка с учетом текущего положения и угла поворота по обратной связи, где вход L это ширина робота;

2) **Motors_control** – блок, реализующий управление приводами, подробное описание которого показано на рис. 4;

3) **Kin_and_Din_MR** – блок, в котором производится расчет нагрузки и данных о положении в пространстве мобильного робота, и по обратной связи передает эти данные в блок **Algorithm**.

Блок **Motors_control** реализует управление четырьмя приводами по принципу дифференциала как показано на рис. 1, таким образом, следует, что:

1) **Drive_1** и **Drive_3** – блоки, реализующие двигатели постоянного тока с независимым возбуждением и ПИД регулятором для левого привода;

2) **Drive_2** и **Drive_4** – блоки, реализующие двигатели постоянного тока с независимым возбуждением и ПИД регулятором для правого привода.

А также блоков 1, 2, 3 и 4, которые переводят линейную скорость в угловую, и блоки **LLL** и **RRR** отвечают за установку скорости для дифференциального привода на левую и правую часть соответственно.

Моделирование данной системы напрямую зависит от блока **Algorithm**, который генерирует диаграмму-задатчик для дифференциального привода, она представлена на рисунке 5. Диаграмма-задатчик формирует сигнал для установки требуемой скорости согласно алгоритму.

Результатами моделирования являются данные об изменении линейной и угловой скоростях (рис. 4), а также изменение нагрузки, которое свидетельствует о изменении скорости на приводах робота. На рис. 7 приведена полученная траектория движения мобильного робота с дифференциальным приводом, который осуществляет поворот на месте, поэтому важным параметром является ширина робота, которая в данном случае была равна 10 см.

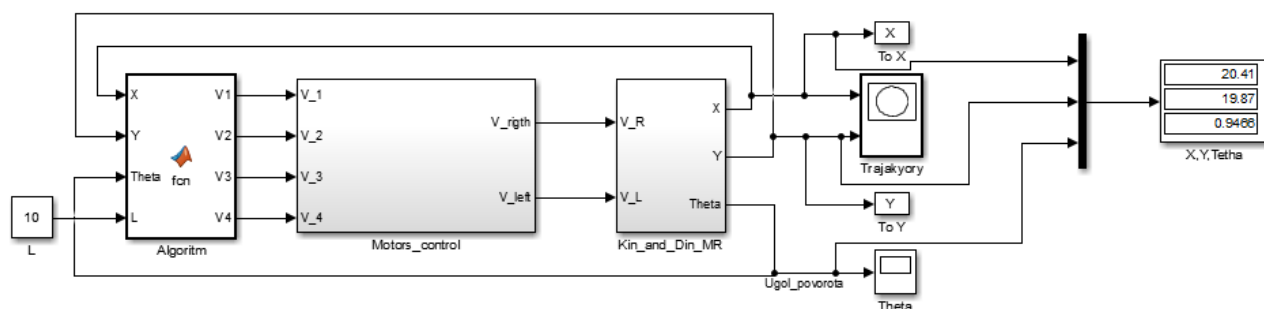


Рис. 3. Математическая модель мобильного робота с расчетом его координат

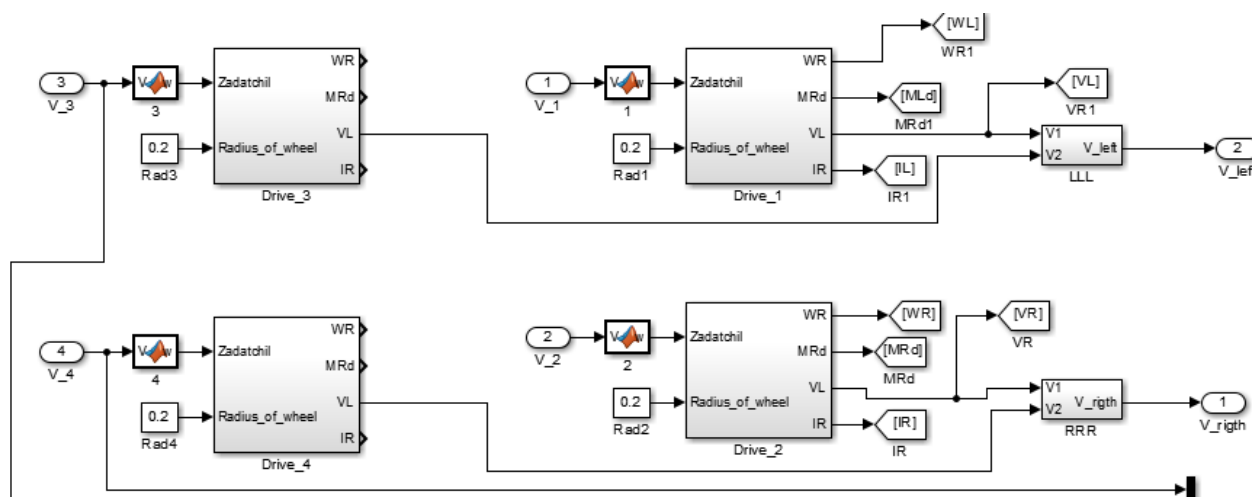


Рис. 4. Содержание блока Motors_control

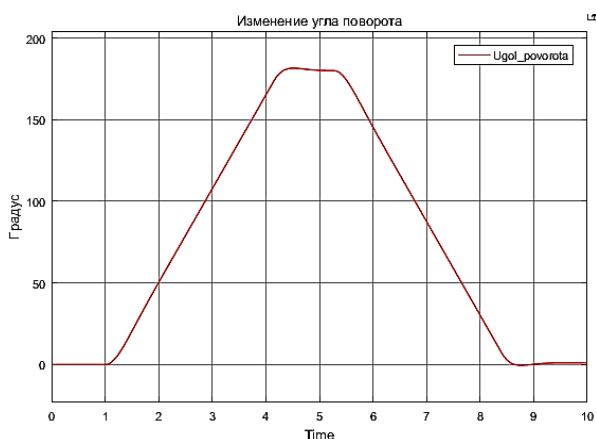


Рис. 5. Изменение угла поворота мобильного робота

Из графика на рисунке 5 следует, что было совершено два поворота и возврат к значению угла поворота как в исходном состоянии.

На графике (рис.6) показаны основные параметры модели, изменяющиеся во времени:

- 1) Диаграмма задатчик это сигнал, использующийся для установки необходимой скорости движения;
- 2) Изменение линейной скорости правого и левого привода;
- 3) Изменение момента нагрузки на двигатели;
- 4) Изменение тока двигателей.

Теперь рассмотрим результаты моделирования более подробно. В момент времени от 0 до 1 секунды мобильный робот движется со скоростью 20 см/с, таким образом за одну секунду было пройдено 20 см, что видно на рисунке 7. Также в течении движения будет изменяться ток и момент нагрузки двигателей мобильного робота при изменении скорости. В момент времени от 1 до 4.14 секунд происходит поворот налево, что видно по изменению скорости на правом и левом приводе и углу поворота на рисунке 5. Таким образом поворот завершится, когда угол будет ра-

вен 180 градусов относительно положения мобильного робота перед поворотом. Далее после достижения необходимого угла происходит движение вперед в момент времени от 4.14 до 5.26 секунд со скоростью 20 см/с. С 5.26 до 8.35 мобильный робот поворачивает направо, пока угол поворота не будет равен нулю, затем с 8.35 до 9.5 происходит прямолинейное движение, пока не будет достигнута правая граница поля, после этого мобильному роботу дана команда остановиться.

На рисунке 7 представлен результат работы данного алгоритма. Траектория мобильного робота прошла из начальной точки с координатой [0;0] в точку [20.41;19.87], это видно из рисунка 3 на блоке X,Y,Tetha. Так как по заданному алгоритму предполагалось достичь координаты [20;20], ошибка позиционирования составляет по оси X равной 0.41 см, а по оси Y 0.13 см, что не превышает допустимой погрешности в 5 % для систем автоматического управления.

Таким образом, алгоритм реализован в точности с концепцией его разработки. В результате моделирования траектории типа змейка мобильный робот сбился с курса на 0.95 градуса, что допустимо для выбранного размера робота.

Изучив результаты данного эксперимента можно сказать, что данный алгоритм, при его дальнейшей модификации, можно использовать для различного размера как и самого робота, так и для поля прямоугольной формы.

Выводы. Разработана математическая модель полноприводного четырехколесного сельскохозяйственного мобильного робота с дифференциальным приводом, позволяющая с высокой степенью точности управлять движением мобильного робота по траектории «змейка», а также в процессе работы данного устройства контролировать координаты и угол поворота по обратной связи.

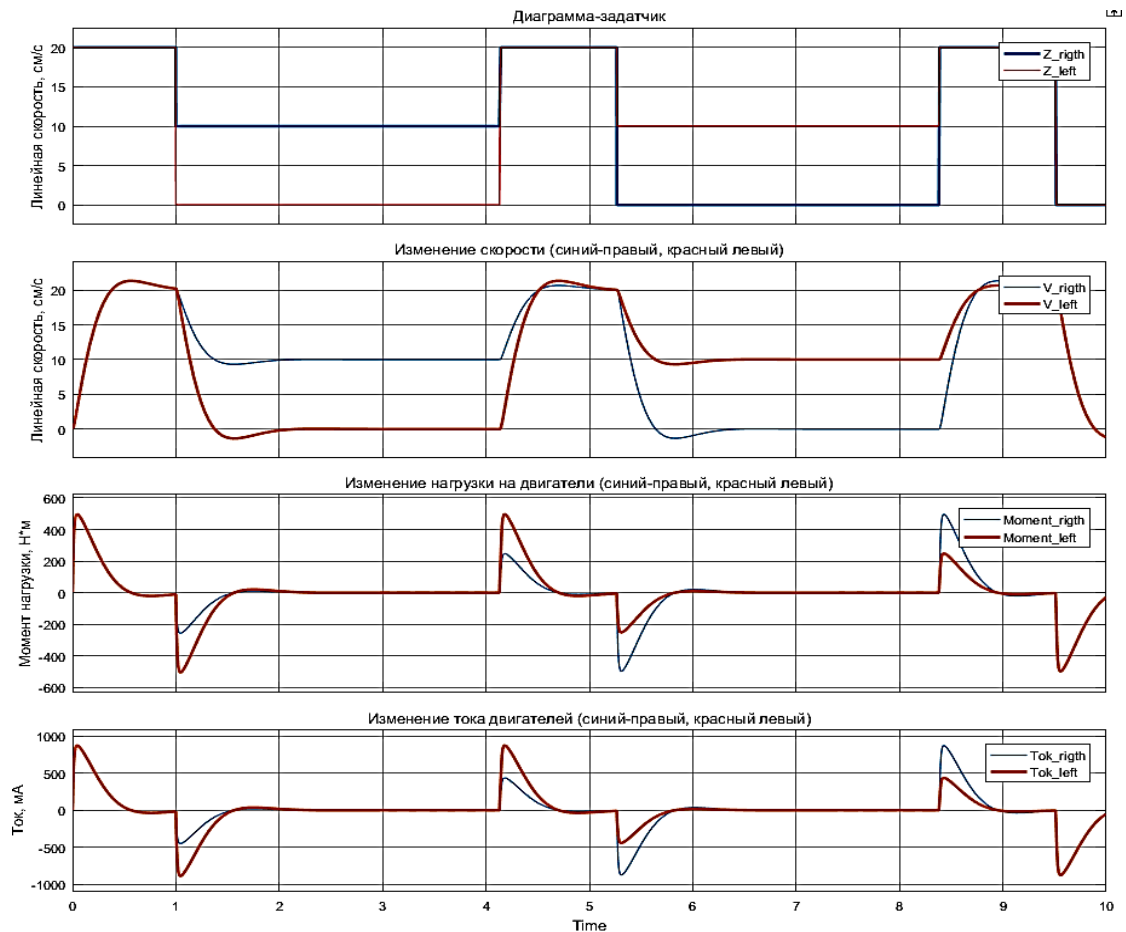


Рис. 6. Изменение основных параметров мобильного робота при прохождении заданной траектории (красная линия – правый двигатель, синяя линия – левый двигатель)

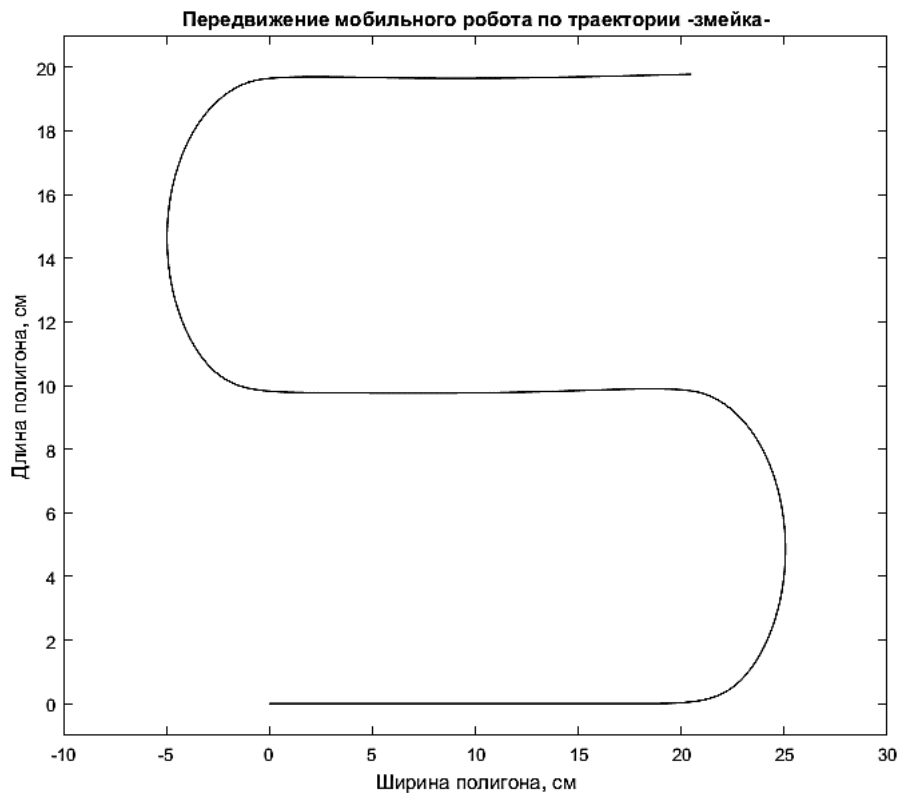


Рис. 7. Траектория мобильного робота, реализованная с помощью блока Algorithm

Источник финансирования. Конкурс УМНИК 17-12 (б), Автонет - 2017 (код 0040407).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Круглова Т.Н., Шошиашвили М.Э., Власов А.С. Динамическая модель трехколесного робота с роликонесящими колесами // Результаты исследований - 2017: материалы III Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и науч. работников ЮРГПУ(НПИ) / Юж.-Рос. гос. политехи. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2017. С. 92–94.
2. Круглова Т.Н., Власов А.С. Управление направленным движением роботизированного трактора // В мире науки и инноваций: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 25 декабря 2016 г., г. Пермь: в 8 ч./ Науч.-издат. центр Аэтерна. Уфа: Аэтерна, 2016. Ч. 8. С. 76–78.
3. Круглова Т.Н., Власов А.С. Математическая модель для расчета угла поворота при управлении беспилотным трактором / В мире науки и инноваций: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 25 декабря 2016 г., г. Пермь: в 8 ч./ Науч.-издат. центр Аэтерна. Уфа: Аэтерна, 2016. Ч. 8. С. 73–76.
4. Farhan A. Salem Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots // International Journal of Current Engineering and Technology. Vol. 3. No. 2. Pp. 253–263.
5. Dušek F., Honc D., Rozsival P.: Mathematical Model of Differentially Steered Mobile Robot // Editors: Fikar M., Kvasnica M. In Proceedings of the 18th International Conference on Process Control. Tatranská Lomnica. Slovakia. 2011. Pp. 221–229.
6. Albagul A. & Wahyudi Dynamic Modelling and Adaptive Traction Control for Mobile Robots // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2004. Vol. 1. No 3. Pp. 149–154.
7. Limin Du. Double closed loop controller of wheeled mobile robot for trajectory tracking based on back-stepping and Lyapunov method. 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017). Pp. 1376–1382.
8. Ahmad A. Mahfouz Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/Simulink. I.J. Intelligent Systems and Applications. 2013. 05. 39–57.
9. Cherry Myint, Nu Nu Win. Position and Velocity control for Two-Wheel Differential Drive Mobile Robot // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). Vol. 5. Issue 9. September, 2016. Pp. 2849–2855.
10. Noga S. Kinematics and dynamics of some selected two-wheeled mobile robots // Archives of civil and mechanical engineering. Vol. VI. No.3.
11. Sandeep Kumar Malu, Jharna Majumdar. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot // Global Journal of Researches in Engineering: HRobotics & Nano-Tech Vol. 14. Issue 1. Version 1.0. Year 2014. Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Inc. (USA) Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861.
12. Yuankai Li, Liang Ding, Guangjun Liu. Attitude-based dynamic and kinematic models for wheels of mobile robot on deformable slope // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 75. Pp. 161–175.
13. Farhan A. Salem. Refined models and control solutions for mechatronics design of mobile robotic platforms // Estonian Journal of Engineering. 2013. 19, 3. Pp. 212–238. doi: 10.3176/eng.2013.3.04.
14. Farhan A. Salem. Mechatronics motion control design of electric machines for desired deadbeat response specifications, supported and verified by new matlab built-in function and simulink model // European Scientific Journal. December, 2013 edition. Vol. 9. No. 36.
15. Farhan A. Salem. Mechatronics design of motion systems; modeling, control and verification // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering. IJMME-IJENS Vol. 13 No:02.

Информация об авторах

Круглова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и гидропневмоавтоматики. E-mail: tatyana.kruglova.02@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Власов Александр Сергеевич, аспирант кафедры мехатроники и гидропневмоавтоматики. E-mail: sasha-vlasov-1993@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Поступила в марте 2019 г.

© Круглова Т.Н., Власов А.С., 2019

¹Kruglova T.N. ^{1,*}Vlasov A.S.¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Russia, 346428, Rostov region, Novocherkassk, str. Prosveshchenia, 132

*E-mail: sasha-vlasov-1993@mail.ru

MODELING OF THE MANAGEMENT SYSTEM OF A FULL-DRIVE FOUR-WHEEL AGRICULTURAL MOBILE ROBOT

Abstract. Widespread robotization is a modern trend in the development of agriculture. Currently, various designs of robots are being actively implemented. They are aimed to replace a human when performing various tasks. Most of these robots are wheeled mobile platform, for which it is necessary to ensure high maneuverability and accuracy of control. This problem can be solved by developing optimal high-precision control algorithms, for the study of which it is advisable to use a mathematical model of a mobile agricultural robot. This article presents the results of modeling the movement of a four-wheel mobile robot with a differential drive that moves across a rectangular field along a "snake state" trajectory that is optimal by speed.

Keywords: agricultural mobile robot, differential drive, mathematical modeling, control algorithms.

REFERENCES

1. Kruglova T.N. Shoshiashvili M.E. Vlasov A.S. Dynamic model of a three-wheeled robot with roller-bearing wheels [*Dinamicheskaya model' trekhkolesnogo robota s rolíkonesushchimi kolesami*]. Rezul'taty issledovaniy – 2017: materialy III Nacional'noj konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i nauch. rabotnikov YURGPU(NPI). Yuzh.-Ros. gos. politekhi, un-t (NPI)im. M.I. Platova. Novocherkassk: YURGTU (NPI). 2017. Pp. 92–94. (rus).
2. Kruglova T.N. Vlasov A.S. Management of the directional movement of a robotic tractor [*Upravlenie napravlenym dvizheniem robotizirovannogo traktora*]. V mire nauki i innovacij: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 25 dekabrya 2016g., Perm': v 8 ch./ Nauch.-izdat. centr Aeterna. 2016. V. 8. Pp. 76–78. (rus)
3. Kruglova T.N. Vlasov A.S. Mathematical model for calculating the angle of rotation when driving an unmanned tractor [*Matematicheskaya model' dlya rascheta ugla povorota pri upravlenii bespilotnym traktorom*]. V mire nauki i innovacij: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 25 dekabrya 2016 g., g. Perm': v 8 ch./ Nauch.-izdat. centr Aeterna. - Ufa : Aeterna, 2016. V. 8. Pp. 73–76. (rus)
4. Farhan A. Salem Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol. 3. No.2. Pp. 253–263.
5. Dušek F., Honc D., Rozsival P. Mathematical Model of Differentially Steered Mobile Robot. Editors: Fikar M., Kvasnica M. In Proceedings of the 18th International Conference on Process Control, Tatranská Lomnica, Slovakia. 2011. Pp. 221–229.
6. Albagul A. & Wahyudi. Dynamic Modelling and Adaptive Traction Control for Mobile Robots. International Journal of Advanced Robotic Systems. Volume 1. Number 3 (2004). ISSN 1729-8806. Pp. 149 - 154.
7. Limin Du. Double closed loop controller of wheeled mobile robot for trajectory tracking based on back-stepping and Lyapunov method. 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017). Pp. 1376–1382.
8. Ahmad A. Mahfouz Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/Simulink. I.J. Intelligent Systems and Applications. 2013. 05. Pp. 39–57.
9. Cherry Myint, Nu Nu Win. Position and Velocity control for Two-Wheel Differential Drive Mobile Robot. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR) Volume 5. Issue 9. September 2016. Pp. 2849–2855.
10. Noga S. Kinematics and dynamics of some selected two-wheeled mobile robots. Archives of civil and mechanical engineering. Vol. VI. No. 3.
11. Sandeep Kumar Malu, Jharna Majumdar. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. Global Journal of Researches in Engineering: HRobotics & Nano-Tech Volume 14 Issue 1 Version 1.0 Year 2014 Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Inc. (USA) Online ISSN: 2249–4596 & Print ISSN: 0975–5861.
12. Yuankai Li, Liang Ding, Guangjun Liu. Attitude-based dynamic and kinematic models for wheels of mobile robot on deformable slope. Robotics and Autonomous Systems. 75 (2016). Pp. 161–175.
13. Farhan A. Salem, Refined models and control solutions for mechatronics design of mobile robotic platforms. Estonian Journal of Engineering, 2013. 19. 3. Pp. 212–238 doi: 10.3176/eng.2013.3.04.
14. Farhan A. Salem. Mechatronics motion control design of electric machines for desired deadbeat response specifications, supported and verified by

new matlab built-in function and simulink model. European Scientific Journal December 2013 edition vol. 9. No.36. ISSN: 1857–7881 (Print) e - ISSN 1857–7431.

15. Farhan A. Salem, Mechatronics design of motion systems; modeling, control and verification International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:13 No:02.

Information about the authors

Kruglova, Tatyana N. PhD, Assistant professor. E-mail: tatyana.kruglova.02@mail.ru. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Russia, 346428, Rostov region, Novocherkassk, str. Prosveshena, 132.

Vlasov, Aleksandr S. Postgraduate student. E-mail: sasha-vlasov-1993@mail.ru. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). Russia, 346428, Rostov region, Novocherkassk, str. Prosveshena, 132.

Received in March 2019

Для цитирования:

Круглова Т.Н., Власов А.С. Моделирование системы управления полноприводным четырехколесным сельскохозяйственным мобильным роботом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 147–154. DOI: 10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694

For citation:

Kruglova T.N., Vlasov A.S. Modeling of the management system of a full-drive four-wheel agricultural mobile robot. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 147–154. DOI: 10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694

DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674

^{1,*}Позевалкин В.В., ¹Парфёнов И.В., ¹Поляков А.Н.¹Оренбургский государственный университет

Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

*E-mail: pozevalkinvv@mail.ru

МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОИЗВОДНЫХ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Аннотация. В статье представлен разработанный на языке программирования высокого уровня модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик станков в режиме реального времени с применением производных высокого порядка. Данный модуль является частью автоматизированной системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станков. Модуль оснащён графическим пользовательским интерфейсом, работает в режиме реального времени, позволяет не только выполнять процедуры сглаживания экспериментальных тепловых характеристик, но и определять их прогнозные значения. Строить кривые скорости, ускорения и резкости изменения температуры во времени. В разработанном программном модуле реализован новый алгоритм, основанный на методе Горнера. Практика разработки алгоритмического обеспечения показала, что выбранный метод очень удобен для машинной реализации и эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге. Экспериментально было подтверждено, что суммарные затраты на выполнение расчётов значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени с применением метода Горнера по описанному алгоритму вполне приемлемы для вычислений в режиме реального времени на стандартном персональном компьютере. С помощью разработанного алгоритма могут обрабатываться как данные температуры, так и данные температурных перемещений рабочих органов станка. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке. Это позволило решить проблему «сдвига во времени на шаг» положения характерных точек.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, тепловые испытания станков, тепловые характеристики, производные, метод Горнера.

Введение. Станки с ЧПУ составляют основу цифрового производства в реальном секторе экономики. Несмотря на то, что проблема энергоэффективности станков с ЧПУ во многом определяет конкурентоспособность действующего производства, тем не менее, проблема обеспечения точности обработки деталей на станках с ЧПУ является более актуальной [1–3]. Практика механообработки показала, что до 75 % всех допускаемых геометрических погрешностей обработки обусловлены тепловыми процессами [4–6]. Важно отметить, что проблема температурной погрешности станков относительно не нова и станкопроизводители уделяют ей самое пристальное внимание. Но появляются новейшие технологии механообработки, которые обязывают решать новые аспекты этой проблемы. Например, сегодня для зубонарезания применяют прогрессивную технологию сухого зубофрезерования червячной фрезой. Авторы работы [7] подсчитали, что если применять этот метод только в автомобилестроении, то ежегодно необходимо будет нарезать 1290 миллионов зубчатых колес. Это является ярким примером роста актуальности тепловых проблем в современном высокотехнологичном производстве. При этом ими экспериментально было установлено, что

применение новой технологии сухого зубофрезерования приводит к погрешностям толщины зуба обрабатываемого колеса до 59 мкм из-за повышенного нагрева обрабатываемой детали. Другие исследователи выявили, что существенная часть потребляемой станком энергии расходуется на системы термостабилизации и компенсации температурной погрешности [8]. При этом проблема обеспечения точности обработки деталей в реальном производстве оказывается более приоритетной в сравнении с экономией энергозатрат [3].

Наряду с системами термостабилизации и компенсации температурной погрешности, в обеспечении точности обработки деталей, важную роль играют автоматизированные системы тепловых испытаний и диагностики [9–11]. Программное обеспечение подобных систем может реализовываться как в специализированных пакетах LabView [12] или Matlab [13], так и с помощью специального авторского программного обеспечения, построенного на базе универсальных языков программирования высокого уровня [14]. Программное обеспечение, разработанное в системах Matlab и LabView, характеризуется высокой степенью надежности. В первую очередь это обусловлено большим набором математических средств, реализованных во встроенных

функциях. У каждой из названных систем есть некоторые особенности, создающие препятствия для их более широкого внедрения при построении автоматизированных систем тепловых испытаний и диагностики. Общим сдерживающим фактором является их высокая рыночная стоимость. Для LabView следует отметить высокий уровень структурированности системы, а для MATLAB неудобство создания загрузочного файла. Для отечественных разработчиков различных IT-решений, дополнительным фактором создания собственных приложений, построен-

ных на базе универсальных языков программирования высокого уровня, является проблема импортозамещения.

Автоматизированная система тепловых испытаний включает следующие элементы: измерительную систему, устройство согласования и преобразования сигналов, термодатчики и датчики температурных перемещений, персональный компьютер, программное средство и интерфейсные устройства. Такая система разработана в Оренбургском государственном университете и представлена на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид подключённой к станку автоматизированной системы:

- 1 – измеритель температуры МИТ-12ТП; 2 – концентратор для подключения датчиков температуры; 3 – конвертор RS-232/USB; 4 – ноутбук с программным средством

Важнейшим компонентом автоматизированной системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станка является модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик в режиме реального времени.

Для разработки модуля были сформулированы следующие задачи:

– на основе полученных результатов исследований необходимо разработать алгоритмы и программное средство, оснащенное графическим пользовательским интерфейсом;

– программное средство должно формировать прогнозные модели тепловых характеристик;

– программное средство должно работать в режиме реального времени;

– программное средство должно поддерживать возможность постоянного развития и совершенствования.

Для представленной на рисунке 1 автоматизированной системы исходной экспериментальной информацией являются данные, полученные от измерителя температуры МИТ-12ТП. Считы-

вание данных осуществляется через универсальную последовательную шину с помощью конвертора RS-232/USB, необходимого для сопряжения измерителя температуры с ЭВМ.

Одним из важнейших элементов разработанной автоматизированной системы тепловых испытаний станков, имеющей практическое применение, является методика сокращения времени проведения натурных тепловых испытаний.

Методика сокращения времени проведения натурных тепловых испытаний. Основная идея методики заключается в определении характерных точек на экспериментальных кривых, позволяющих принять решение о прекращении натурного эксперимента. Распределение этих точек во времени, указывает на кинетику изменения тепловых процессов в станке. Причём особенностью их проявления, является фиксация момента времени эксперимента, после достижения которого, с наибольшей точностью обеспечивается прогнозирование тепловых характеристик [13]. На рис. 2 представлены основные этапы реализации методики сокращенных тепловых испытаний.

В процессе тепловых испытаний выполняются расчёты скорости, ускорения, и резкости изменения тепловых характеристик в режиме реального времени. В основе этих расчётов лежат процедуры аппроксимации и вычисления производных.

На начальном этапе реализации методики к исходным экспериментальным данным применяется процедура аппроксимации с помощью степенной полиномиальной функции. Затем необходимо вычислить все производные до третьего порядка включительно. Следует отметить, что степень полиномиальной функции должна быть как минимум на единицу больше максимального порядка производной. В нашем случае производные первого порядка представляют собой значения скорости изменения температуры во времени. Производные второго порядка ускорение, а производные третьего порядка резкость изменения температуры во времени.

Выполняя этапы 1-5 (рис. 2) последовательно-параллельно в режиме реального времени, можно зафиксировать момент начала температурной стабилизации и достичь эффекта сокращения времени проведения натурных тепловых испытаний. Но прежде чем приступить к вычислению нормированного коэффициента-индикатора, необходимо предварительно вычислить производные. Для экспериментальных данных, представляющих собой ступенчатую дискретную функцию, вычисление производных представляет собой не тривиальную задачу.



Рис. 2. Основные этапы реализации методики сокращенных тепловых испытаний

Согласно ранее разработанной методике [13] положение специфических точек экспериментальных тепловых характеристик может быть выявлено с помощью производных высокого порядка. Однако для более точной фиксации характерных точек выполняется расчёт нормированного коэффициента-индикатора $K_{\text{вар}}(t_i)$.

Теоретические основы метода вычисления производных. Практика определения производных интерполяционными формулами показала наличие проблемы «сдвига во времени на шаг» положения (во времени) характерных точек. В данной работе предлагается применить другой метод вычисления производных, который должен помочь решить эту проблему.

На данный момент известно множество различных методов вычисления производных высокого порядка от полинома произвольной степени. Среди них существует метод неопределённых коэффициентов [15, 16]. Суть этого метода заключается в том, что значения производной в узлах вычисляются как линейные комбинации значений функции:

$$Y^{(k)}(x_p) = \sum_{j=0}^m C_j^{(p)} Y_j + R_m(f), \quad (1)$$

где k – порядок производной; m – степень полинома; $C_j^{(p)}$ – коэффициенты численного дифференцирования; $R_m(f)$ – остаток.

Коэффициенты, в свою очередь, могут быть найдены из системы уравнений:

$$\sum_{j=0}^m C_j^{(p)} X_j^p = \begin{cases} 0 & p = 0, 1, \dots, k-1; \\ \frac{p!}{(p-k)!} X_i^{p-k} & p = k, k-1, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что систему (2) необходимо решать $m+1$ раз, а это значит, что речь может идти о существенных вычислительных затратах. Так же следует учесть тот факт, что коэффициенты последних уравнений системы, то есть мономы вида X_m^k становятся настолько большими числами, что их разрядность может переполнять разрядную сетку процессора. Кроме того, коэффициенты первых и последних уравнений это числа разных порядков, следовательно, точность вычислений будет очень низка.

Для степенного полинома следующего вида:

$$p(x) = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0, \quad (3)$$

где x – переменная; m – степень полинома; a – постоянные коэффициенты.

Очевидным способом решения является вычисление каждого монома по отдельности, а затем сложение их вместе. Но это не самый эффективный способ. Гораздо эффективнее применить метод Горнера. Реализацию данного метода можно получить из уравнения (3), если вынести переменную x за скобки всюду, где это возможно. В результате уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$p(x) = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0 = (b_0 x^{m-1} + b_1 x^{m-2} + \dots + b_{m-2} x + b_{m-1})(x - q) + b_m. \quad (8)$$

Коэффициенты b для полинома $p(q)$ рассчитываются по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_m, \\ b_1 &= a_m q + a_{m-1}, \\ b_2 &= a_m q^2 + a_{m-1} q + a_{m-2}, \\ &\dots \\ b_{m-1} &= a_m q^{m-1} + a_{m-1} q^{m-2} + \dots + a_2 q + a_1, \\ b_m &= a_m q^m + a_{m-1} q^{m-1} + \dots + a_1 q + a_0. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате получаем конструктивную реализацию теоремы об остатке:

$$p(x) = p_1(x)(x - q) + p(q). \quad (10)$$

Вычислить значение полинома $p_1(x)$, степень которого на единицу меньше степени полинома $p(x)$ можно с помощью следующего уравнения:

$$p(x) = (\dots((a_m x + a_{m-1})x + a_{m-2})x + \dots + a_1)x + a_0. \quad (4)$$

Для дальнейшей реализации метода вычисления производных, полином (3) с его коэффициентами оценивается на элементе q путём замены каждой переменной x на переменную q до получения полинома следующего вида:

$$p(q) = a_m q^m + a_{m-1} q^{m-1} + \dots + a_1 q + a_0. \quad (5)$$

Теперь можно рекурсивно вычислить $p(q)$. Пусть:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_m \\ b_k &= b_{k-1} q + a_{m-k} \end{aligned} \quad 1 \leq k \leq m, \quad (6)$$

где k – порядок производной; b – постоянные коэффициенты.

Согласно теореме Безу [18], разделив полином (3) на бином $(x - q)$, в остатке получим число равное значению данного полинома при $x = q$ то есть:

$$p(q) = b_m. \quad (7)$$

В развёрнутом виде уравнение деления полинома на бином с остатком можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1(x) &= (a_1 + a_2 q + \dots + a_{m-1} q^{m-2} + a_m q^{m-1}) + \\ &+ (a_2 + \dots + a_{m-1} q^{m-3} + a_m q^{m-2})x + \dots + \\ &+ (a_{m-2} + a_{m-1} q + a_m q^2)x^{m-3} + \\ &+ (a_{m-1} + a_m q)x^{m-2} + \\ &+ a_m x^{m-1} = a_1 + a_2(x + q) + \dots + \\ &+ a_{m-1}(q^{m-2} + \dots + qx^{m-3} + x^{m-2}) + \\ &+ a_m(q^{m-1} + \dots + q^2 x^{m-3} + qx^{m-2} + x^{m-1}). \end{aligned} \quad (11)$$

При этом полином $p_1(q)$ можно вычислить по формуле:

$$p_1(q) = a_1 + 2a_2 q + \dots + (m-1)a_{m-1} q^{m-2} + ma_m q^{m-1}. \quad (12)$$

Теперь можно применить одно из свойств метода Горнера, а именно: если умножить производную функцию на число, то и остаток от деления функции на это число возрастёт во столько же раз. Следовательно, для того, чтобы получить значение производной, достаточно просто умножить полученные коэффициенты полинома от деления на числа $1, 2, \dots, k$, в зависимости от того, производную какого порядка необходимо определить в данный момент, а затем вычислить остаток.

Можно проверить данное утверждение. Для этого запишем уравнение полинома произвольной степени:

$$p(x) = \sum_{k=0}^m p_k(q)(x-q)^k. \quad (13)$$

А так же уравнение его производной первого порядка:

$$p'(x) = \sum_{k=1}^m k p_k(q)(x-q)^{k-1}. \quad (14)$$

Следует обратить внимание на то, что данное преобразование выполняется алгебраически, отождествлением коэффициентов $p'(x)$ в терминах коэффициентов $p(x)$. Здесь нет необходимости использовать понятие предела. Кроме того, с помощью формул (13) и (14) могут быть продемонстрированы общие правила производной относительно производных сумм, произведений и состава полинома. Можно продолжить выполнение итерации дифференцирования для получения производных более высокого порядка. Поскольку дифференцирование уменьшает степень полинома на единицу, то полином степени m действителен тогда и только тогда, когда его m -я производная является ненулевой константой.

Теперь можно записать уравнение для вычисления производной высокого порядка от полинома произвольной степени:

$$p^{(k)}(x) = \sum_{i=k+1}^m i(i-1)\dots(i-k+1)(x-q)^{i-k} + k! p_k(q), \quad (15)$$

где $1 \leq k \leq m$.

Подставив в формулу (15) q вместо x , получим:

$$p^{(k)}(q) = k! p_k(q). \quad (16)$$

А это означает, что:

$$p(x) = \sum_{k=0}^m \frac{p^{(k)}(q)}{k!} (x-q)^k. \quad (17)$$

При нулевом значении q полином $p(x)$ имеет кратность m только в том случае, если $p(x)$ можно представить в виде $p(x) = (x-q)^m p_1(x)$, при $p_1(q) \neq 0$. Из разложения в ряд Тейлора видно, что это эквивалентно $p(q) = p'(q) = \dots = p^{(m-1)}(q) = 0$ и $p^{(m)}(q) \neq 0$.

На данный момент ни в одной из известных систем символьных вычислений как отечественного, так и зарубежного производства нет процедуры, реализующей алгоритм описанного выше метода вычисления производных.

Алгоритм метода вычисления производных. Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм вычисления значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени.

Начальные данные: значение аргумента x , максимальный порядок производной k , вектор коэффициентов полинома $\{A_i\} (i=0, \dots, m)$ и степень полинома m .

Начальные действия. Создаём вспомогательный массив $\{P_i\}$ для хранения значений производных, в котором номера элементов меняются как: $i = 0, \dots, k$.

Шаг 1. Заполняем массив значений производных P начальными данными. Цикл с индексацией по i , меняющейся от 0 до k :

$$P_i = A_m. \quad (18)$$

Шаг 2. Вычисление значения полинома по формуле (4) и остатка от деления по формуле (10). Внешний цикл по i , меняющейся от m до 0:

$$P_0 = P_0 * x + A_i. \quad (19)$$

Если $i > k$, то $l = k$ иначе $l = i$. Вложенный цикл по j , меняющейся от 1 до l :

$$P_j = P_j * x + P_{j-1}. \quad (20)$$

Шаг 3. Вычисление значений производных по формуле (16). Создаём вспомогательную переменную f , для расчёта факториала $f = 1$. Цикл с индексацией по i , меняющейся от 1 до k :

$$\begin{aligned} f &= f * i, \\ P_i &= P_i * f. \end{aligned} \quad (21)$$

Суммарные затраты на выполнение расчётов значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени с применением метода Горнера [19, 20] по описанному выше алгоритму вполне приемлемы. Указанный метод очень удобен для машинной реализации и достаточно эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге, что, в свою очередь, позволяет решать подобные уравнения с повышенной степенью точности без существенных машинных погрешностей. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке.

Результаты эксперимента. Разработанное программное средство, включающее в свой состав программную реализацию описанного выше алгоритма, было написано на языке программирования высокого уровня Pascal в среде разработки Embarcadero RAD Studio Delphi XE6. Проведена проверка его эффективности при расчёте производных высокого порядка от полинома произвольной степени, а также нормированного коэффициента-индикатора для экспериментальных тепловых характеристик станка модели 400V. В качестве иллюстрации полученных результатов

на рис. 3 представлена экранная форма программного средства, обеспечивающего построение графика исходных экспериментальных данных, а также модельных значений аппроксимирующей функции.

На рис. 4 представлена экранная форма, иллюстрирующая расчётные значения скорости, ускорения и резкости изменения температуры во времени, а также показатели нормированного коэффициента-индикатора тепловых характеристик станка в виде графиков.

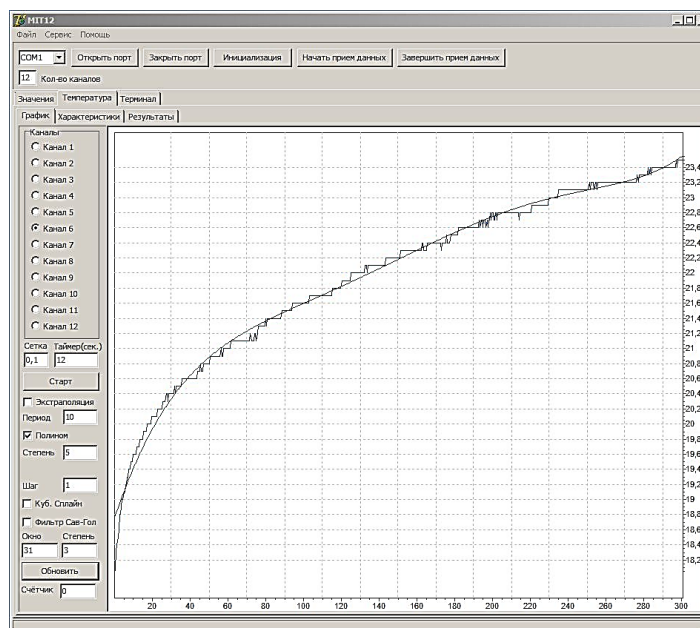


Рис. 3. График исходных экспериментальных данных и аппроксимирующей функции

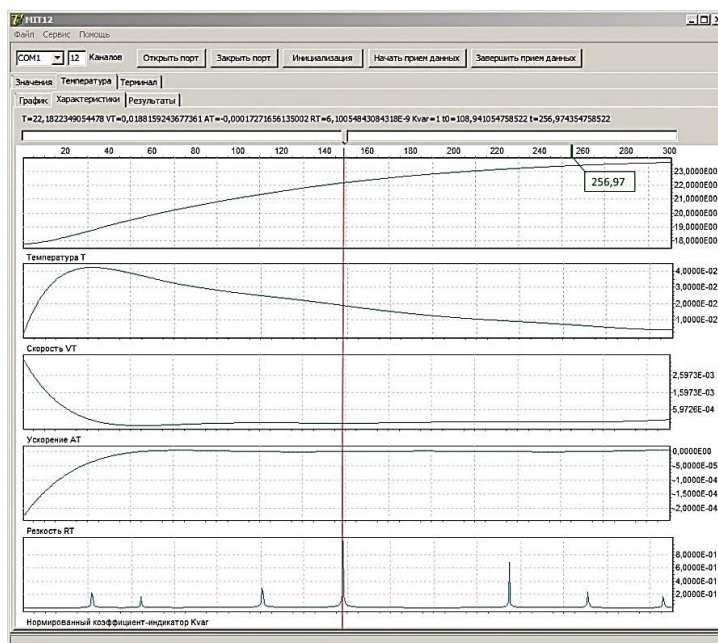


Рис. 4. Графики производных и нормированного коэффициента-индикатора

Из графиков (рисунок 4) видно, что первые два пика, позволяют с высокой степенью точности идентифицировать характерные точки 1 и 2, представленные на характеристиках изменения температуры $T(t)$, скорости $VT(t)$, ускорения $AT(t)$ и резкости $RT(t)$. Четвертый пик на 147-й минуте, фиксирует время начала процесса температурной стабилизации и завершения эксперимента. А также позволяет рассчитать значение времени температурной стабилизации с относительно малой для реального эксперимента погрешностью. Погрешность определения времени температурной стабилизации, зафиксированная в данном эксперименте, не превысила 10 минут. Все последующие, после 220-ой минуты, пики на графике коэффициента-индикатора (рисунок 4) являются флуктуациями, свидетельствующими о завершающем этапе процесса температурной стабилизации.

Заключение. Таким образом, разработанный программный модуль показал эффективность реализации подхода в разработке программного обеспечения системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станка, основанного на применении универсальных языков программирования высокого уровня.

Представлен новый алгоритм, реализующий метод Горнера. Практика разработки алгоритмического обеспечения показала, что выбранный метод (Горнера) удобен для машинной реализации и достаточно эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге. Это, в свою очередь, позволяет решать сформированные уравнения с повышенной степенью точности без существенных машинных погрешностей. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке, что позволило решить проблему «сдвига во времени на шаг» положения (во времени) характерных точек.

В заключении следует отметить, что по единым разработанным алгоритмам могут обрабатываться как данные температуры, так и данные температурных перемещений рабочих органов станка. Как ранее было показано [21], температурные перемещения рабочих органов станка можно зафиксировать измерительным щупом, установленным в шпинделе. Данные о результатах измерений хранятся в виде predetermined переменных пользователя. Например, для систем ЧПУ Sinumerik в виде R-параметров. В этом случае программный модуль обработки экспериментальных данных должен дополнительно обеспечивать обмен данными с системой ЧПУ. Тогда появится возможность в режиме реального

времени строить экспериментальные зависимости «температуры-температурные перемещения».

Источник финансирования. РФФИ и Оренбургская область в рамках научного проекта № 19-48-560001; Министерство образования Оренбургской области в рамках НИР «Интеллектуальная автоматизированная система диагностики теплового состояния станков с ЧПУ на основе методов аналитического прогнозирования».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S. et al. Precision and Efficiency of Metal-Cutting // Machines Russ. Engin. Res. 2016. Vol. 36. No. 9: 762–773. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090070>
2. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Pp. 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>
3. Grobmann K. et al., “Thermo-Energetic Design of Machine Tools”, Springer, 2015. 260 p.
4. Weck M. et al. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools // Annals of the CIRP. 1995. Vol. 44(2). Pp. 589–598.
5. Jedrzejewski J. et al, Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling // Journal of Mechanical Engineering. 2008. Vol. 8(3). Pp. 29–41.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools // Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61(2). Pp. 771–792.
7. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation // Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol.86. Issue 5–8. Pp. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>.
8. Ge Z. & Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools // Int J Adv Manuf Technol 2018. Vol. 97. Issue 1-4. Pp. 1253–1268. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1992-z>
9. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools // Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 91, Issue 1–4. Pp 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>
10. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin // J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5. Pp 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>.
11. Guo Z., Liu S., Wang H. Dynamic modeling and experimental verification for the feeding system

of a gantry machine tool based on thermal-mechanical coupling // *Int J Adv Manuf Technol* 2016. Vol. 85. Pp. 227. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7941-1>

12. Guo Q., Xu R., Mao C. et al. Application of information fusion to volumetric error modeling of CNC machine tools // *Int J Adv Manuf Technol*. 2015. Vol. 78. Pp. 439. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6656-z>

13. Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Методика тепловых испытаний станков на основе кинетических и динамических характеристик температурных перемещений рабочих органов // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2018. № 7. С. 34–39.

14. Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Исследование алгоритма построения степенных интерполяционных полиномов при обработке экспериментальных данных в тепловых испытаниях станков // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 4. С. 109–118.

15. Новиков А.И. О суммировании многочленов и методе неопределённых коэффициентов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2011. № 36. С. 98–102.

16. Мироненко Л.П., Петренко И.В. Стандартные пределы и метод неопределённых коэффициентов // *Искусственный интеллект*. 2012. № 3. С. 284–291.

17. Медведева Т.А. О некоторых применениях схемы Горнера при решении задач математического анализа // *Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки*. 2009. № 3 (7). С. 142–145.

18. McKinnon D. An Arithmetic Analogue of Bezout's Theorem. *Compositio Mathematica*. April 2001. Volume 126. Issue 2. Pp 147–155.

19. Муха В.С., Корчиц К.С. Схема Горнера для многомерно-матричных полиномов // *Вычислительные методы и программирование*. 2005. Т. 6. С. 61–65.

20. Sylvie Boldo, Marc Daumas. A simple test qualifying the accuracy of Horner's rule for polynomials // *Numerical Algorithms*, Springer Verlag, 2004. Vol. 37 (1-4). Pp. 45–60.

21. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Каменев С.В. Методика экспериментальной оценки температурной погрешности станка на рабочем ходу // *СТИН*. 2017. № 11. С. 29–32.

Информация об авторах

Позевалкин Владимир Владимирович, аспирант кафедры систем автоматизации производства. E-mail: pozevalkinvv@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Парфёнов Игорь Валентинович, кандидат технических наук, декан факультета дистанционных образовательных технологий. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила в январе 2019 г.

© Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н., 2019

^{1,*}Pozevalkin V.V., ¹Parfenov I.V., ¹Polyakov A.N.

¹Orenburg State University

Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

*E-mail: pozevalkinvv@mail.ru

MODULE OF PROCESSING EXPERIMENTAL THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINE TOOLS IN REAL-TIME MODE USING HIGH ORDER DERIVATIVES

Abstract. The article presents processing module of experimental thermal characteristics of machine tools in real time using high order derivatives. It is developed in a high level programming language. This module is a part of automated system of tests and diagnostics of machines thermal state. The module is equipped with a graphical user interface; it works in real time, allows performing procedures for smoothing experimental thermal characteristics and determining their prognostic values. This allows building curves of speed, acceleration and sharpness of temperature change over the time. The developed software module implements a new algorithm based on the Horner's method. The practice of developing algorithmic software shows that the chosen method is very convenient and effective for machine implementation, due to the absence of a division

operation at each computational step. It is experimentally confirmed that the total costs of performing the calculations of high order derivatives of an arbitrary degree polynomial using the Horner's method according to the described algorithm are acceptable for real-time calculations on a standard personal computer. Data temperature and temperature movements of the machine working bodies can be processed using the developed algorithms. In addition, this algorithm allows calculating the value of the approximating polynomial and simultaneously obtaining the values of all its derivatives at a given point. This allows to solve the problem of "shift in time by step" of the position of characteristic points.

Keywords: CNC machine, thermal testing of machine tools, thermal characteristics, derivatives, Horner's method.

REFERENCES

1. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S. et al. Precision and Efficiency of Metal-Cutting. Machines Russ. Engin. Res. 2016. Vol. 36. No. 9: 762–773. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090070>
2. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Pp. 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>
3. Grobmann K. et al., "Thermo-Energetic Design of Machine Tools", Springer, 2015. 260 p.
4. Weck M. et al. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. Annals of the CIRP. 1995. Vol. 44(2). Pp. 589–598.
5. Jedrzejewski J. et al, Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling. Journal of Mechanical Engineering. 2008. Vol. 8(3). Pp. 29–41.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61(2). Pp. 771–792.
7. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol.86. Issue 5–8. Pp. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>.
8. Ge Z. & Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools. Int J Adv Manuf Technol 2018. Vol. 97. Issue 1-4. Pp. 1253–1268. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1992-z>
9. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 91, Issue 1–4. Pp. 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>
10. Zhou ZD., Gui L., Tan YG. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5. Pp 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>.
11. Guo Z., Liu S., Wang H. Dynamic modeling and experimental verification for the feeding system of a gantry machine tool based on thermal-mechanical coupling. Int J Adv Manuf Technol 2016. Vol. 85. Pp. 227. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7941-1>
12. Guo Q., Xu R., Mao C. et al. Application of information fusion to volumetric error modeling of CNC machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2015. Vol. 78. Pp. 439. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6656-z>
13. Parfenov I.V., Polyakov A.N. Technique of heat testing of machines based on the kinetic and dynamic characteristics of the temperature displacements of the working bodies [Metodika teplovyh ispytaniy stankov na osnove kineticheskikh i dinamicheskikh harakteristik temperaturnykh peremeshchenij rabochih organov]. Repair. Recovery. Modernization. 2018. No. 7. Pp. 34–39. (rus)
14. Pozevalkin V.V., Parfenov I.V., Polyakov A.N. The study of the algorithm for constructing power interpolation polynomials in the processing of experimental data in thermal tests of machine tools [Issledovanie algoritma postroeniya stepennykh interpolacionnykh polinomov pri obrabotke eksperimental'nyh dannykh v teplovykh ispytaniyakh stankov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 4. Pp. 109–118. (rus)
15. Novikov A.I. On the summation of polynomials and the method of indefinite coefficients [O summirovanii mnogochlenov i metode neopredelyonnykh koefitsientov]. Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University. 2011. No. 36. Pp. 98–102. (rus)
16. Mironenko L.P., Petrenko I.V. Standard limits and the method of uncertain coefficients [Standard limits and method of undefined coefficients] Artificial Intelligence. 2012. No. 3. Pp. 284–291. (rus)
17. Medvedeva T.A. On some applications of the Horner scheme for solving problems of mathematical analysis [O nekotorykh primeneniyyakh skhemy Gornera pri reshenii zadach matematicheskogo analiza]. News of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet: Psychological and Pedagogical Sciences. 2009. No. 3 (7). Pp. 142–145. (rus)
18. McKinnon D. An Arithmetic Analogue of Bezout's Theorem. Compositio Mathematica. April 2001. Vol.126. Issue 2. Pp. 147–155.
19. Mukha V.S., Korchits K.S. Horner's scheme for multidimensional polynomials [Skhema Gornera

dlya mnogomernomatrichnyh polinomov] Computational methods and programming. 2005. Vol. 6. Pp. 61–65. (rus)

20. Sylvie Boldo, Marc Daumas. A simple test qualifying the accuracy of Horner's rule for polynomials. Numerical Algorithms, Springer Verlag, 2004. Vol. 37 (1-4). Pp. 45–60.

21. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Kamenev S.V. Methods of experimental evaluation of the temperature error of the machine at the working course [Metodika eksperimental'noj ocenki temperaturnoj pogreshnosti stanka na rabochem hodu]. STIN. 2017. No. 11. Pp. 29–32. (rus)

Information about the authors

Pozevalkin, Vladimir V. Postgraduate student. E-mail: pozevalkinvv@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Parfenov, Igor' V. PhD, Assistant professor. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Received in January 2019

Для цитирования:

Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик станков в режиме реального времени с применением производных высокого порядка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 155–164. DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674

For citation:

Pozevalkin V.V., Parfenov I.V., Polyakov A.N. Module of processing experimental thermal characteristics of machine tools in real-time mode using high order derivatives. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 155–164. DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674

DOI: 10.34031/article_5cd6df492da642.78472895

^{1,*}Семикопенко И.А., ¹Воронов В.П., ¹Смирнов Д.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: semikopenko.ia@bstu.ru

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗОЧНОГО УЗЛА ДЕЗИНТЕГРАТОРА ПРИ УСТАНОВКЕ ПАТРУБКА РЕЦИКЛА МАТЕРИАЛА

Аннотация. В настоящее время дезинтеграторы являются одним из видов оборудования, применяемого при помоле, смешении и активации ряда материалов. Одним из преимуществ дезинтеграторов является возможность получения продукта помола с заданным гранулометрическим составом. Для получения узкого гранулометрического состава продукта помола была создана экспериментальная установка с патрубком рецикла, обеспечивающего разгрузку готового продукта и возврат крупки на дополнительное измельчение в камеру помола. Патрубок рецикла представляет собой резиноканевую трубу круглого поперечного сечения с радиусом кривизны, обеспечивающим движение двухфазной среды из зоны разгрузки к загрузочной части дезинтегратора. При выполнении теоретических исследований процесса помола необходимо согласовать пропускные способности загрузочного узла и патрубка рецикла дезинтегратора. Кроме этого, для сбалансированной работы дезинтегратора и питателя необходимо, чтобы массовый расход материала через питатель и массовый расход материала (пропускная способность) проходящего через ряды ударных элементов совпадали. Массовая пропускная способность крупнодисперсного материала, движущегося в патрубке рецикла, была определена исходя из предположения о линейном характере изменения насыпной плотности при движении материала внутри патрубка рецикла. В результате теоретических исследований получено аналитическое выражение, позволяющее определить радиус трубы модернизированного питателя исходя из конструктивных и технологических параметров дезинтегратора с патрубком рецикла. Представлена расчетная схема для определения радиуса трубы усовершенствованного дезинтегратора. Анализ полученного аналитического выражения позволяет сделать вывод, что радиус трубы модернизированной установки связан с конструктивными и технологическими параметрами дезинтегратора.

Ключевые слова: дезинтегратор, патрубок рецикла, материал.

При вводе в загрузочный узел дезинтегратора патрубка рецикла, через который поступает крупнодисперсный материал на доизмельчение в камеру помола, необходимо изменить диаметр трубы выпускного отверстия бункера, чтобы согласовать его пропускную способность по материалу, поступающему в камеру помола с пропускной способностью рядов ударных элементов дезинтегратора. Для сбалансированной работы дезинтегратора и питателя, не содержащего патрубков рецикла необходимо, чтобы массовый расход материала через питатель и массовый расход материала (пропускная способность) проходящего через ряды ударных элементов совпадали.

Согласно результату работы [1] данный баланс будет соблюдаться при выполнении следующего равенства:

$$\frac{2\pi H \omega R_k^2}{(R_k - R_{\partial}) \cdot f} \left[\frac{\gamma_k - \gamma_0}{3} R_k + \frac{(\gamma_0 - \gamma_k) R_{\partial}}{4} \right] = \pi \gamma_0 R_{\partial H}^2 \sqrt{\frac{g R_{\partial H}}{2tg\alpha}}, \quad (1)$$

где R_{∂} – радиус распределительного диска в камере помола; R_k – радиус корпуса камеры помола; $R_{\partial H}$ – радиус выпускного отверстия трубы бункера без ввода патрубка рецикла; H – высота

камеры помола; ω – циклическая частота вращения ротора; f – коэффициент трения частицы о поверхность ударного элемента; γ_0 – плотность насыпного материала в бункере; γ_k – насыпная плотность готового продукта; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона образующей конуса бункера к вертикали.

Вычислим массовую пропускную способность крупнодисперсного материала, движущегося в патрубке рецикла. Искомую величину которого можно найти согласно следующему выражению:

$$Q_{кр} = \frac{d}{dt} \iiint_V \gamma(r) dV, \quad (2)$$

где $\gamma(r)$ – изменение насыпной плотности материала, движущегося в патрубке рецикла.

Функциональную зависимость $\gamma(r)$ можно найти исходя из предположения о линейном характере изменения насыпной плотности при движении материала внутри патрубка рецикла:

$$\gamma(r) = \gamma_k + \frac{\gamma_{кр} - \gamma_k}{R_* - R_3} (r - R_3). \quad (3)$$

Здесь $\gamma_{кр}$ – насыпная плотность крупнодисперсной части потока в патрубке рецикла. r – текущая координата внутри патрубка рецикла; R_3 – радиус внешней поверхности патрубка рецикла; R_* – радиус центральной части патрубка рецикла.

С учетом (3) выражение (2) можно представить в виде

$$Q_{кр} = \frac{d_0}{dt} \int_{-d_0/2}^{d_0/2} dz \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi \int_{K \cdot R}^{R_*} \left(\gamma_K + \frac{\gamma_{кр} - \gamma_K}{R_* - R_3} (r - R_3) \right) r dr, \quad (4)$$

$K \cdot R$ – радиальный размер для установки, регулируемой поворотной заслонкой (см. рисунок).

d_0 – диаметр патрубка рецикла.

Интеграл (4) можно привести к следующему виду:

$$Q_{кр} = d_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi \int_{K \cdot R}^{R_*} \left(\gamma_K \frac{dr}{dt} + 2 \frac{\gamma_{кр} - \gamma_K}{R_* - R_3} r \frac{dr}{dt} - \frac{\gamma_{кр} - \gamma_K}{R_* - R_3} R_3 \frac{dr}{dt} \right) dr, \quad (5)$$

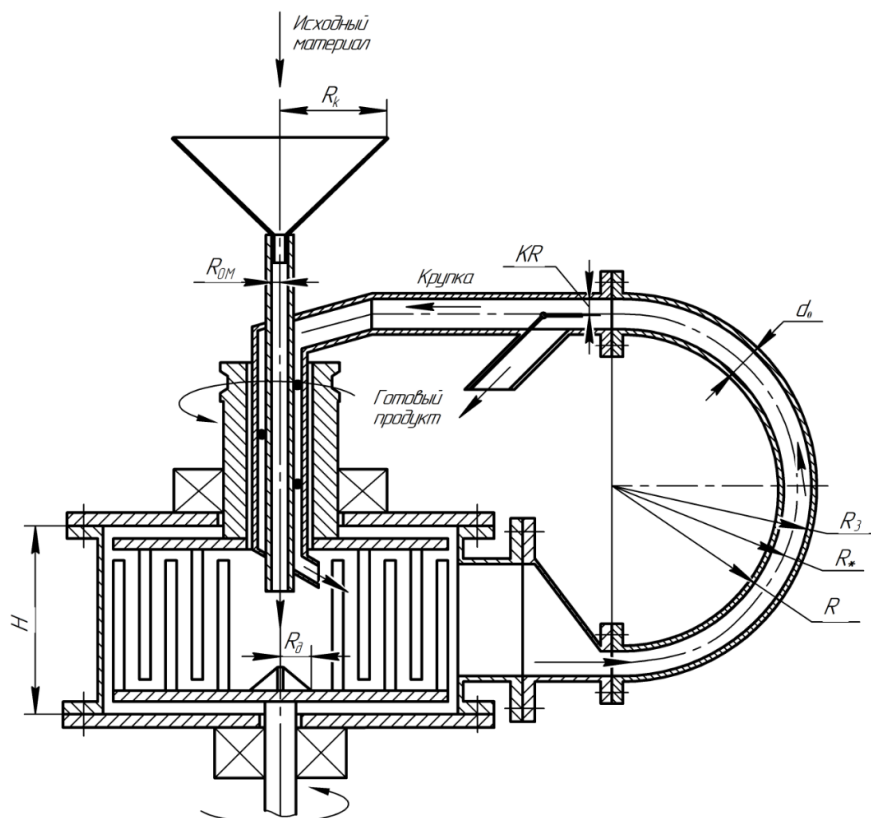


Рис. 1. Расчетная схема для определения конструктивных параметров загрузочного узла дезинтегратора с патрубком рецикла материала

Если учесть, что:

$$\frac{dr}{dt} = v_r, \quad (6)$$

$$\frac{m v_\phi^2}{r} = 3\pi \mu d_r \cdot v_r \quad (7)$$

$$m = \frac{\pi d_r^3}{6} \cdot \rho, \quad (8)$$

$$v_\phi \approx u_\phi = \sqrt{u_0^2 - 2Rg(1 + \sin \phi)}. \quad (9)$$

На основании (7) с учетом (6), (8) и (9) находим:

$$v_r = \frac{\rho d_r^2 (u_0^2 - 2Rg \sin \phi)}{18\mu \cdot r}, \quad (10)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха; ϕ, r – полярные координаты в плоскости патрубка рецикла; v_ϕ – скорость частиц материала в патрубке рецикла; u_0 – скорость воздуха в патрубке рецикла; ρ – плотность частицы материала; d_r – диаметр частиц материала; R – внутренний радиус кривизны патрубка рецикла.

Подстановка (6) с учетом (10) в (5) приводит к следующему результату:

$$Q_{кр} = \frac{d_0 \cdot \rho \cdot d_r^2}{18\mu} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi \int_{K \cdot R}^{R_*} \left(\gamma_K \cdot \frac{u_0^2 - 2gR(1 + \sin \phi)}{r} + 2 \cdot \frac{\gamma_{кр} - \gamma_K}{R_* - R_3} \cdot (u_0^2 - 2Rg(1 + \sin \phi)) - \frac{\gamma_{кр} - \gamma_K}{R_* - R_3} \cdot R_3 \cdot \frac{u_0^2 - 2gR(1 + \sin \phi)}{r} \right) dr. \quad (11)$$

Вычисление интеграла (11) приводит к следующему результату:

$$Q_{кр} = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \rho \cdot d_r^2 (u_0^2 - 2Rg)}{18\mu} \left[\left(\gamma_{кр} - \frac{\gamma_{кр} - \gamma_{кр}}{R_* - R_3} R_3 \right) \ln \frac{R_*}{R_{кр}} + 2 \frac{R_* - R_{кр}}{R_* - R_3} (\gamma_{кр} - \gamma_{кр}) \right]. \quad (12)$$

Для сбалансированной работы дезинтегратора с рециклом крупнодисперсного материала

необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение:

$$\frac{2\pi H \omega \cdot R_{кр}^2}{(R_{кр} - R_{д})f} \left[\frac{\gamma_{кр} - \gamma_0}{3} R_{кр} + \frac{\gamma_0 R_{д} - \gamma_{кр} R_{д}}{4} \right] + \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \rho \cdot d_r^2 (u_0^2 - 2Rg)}{18\mu} \cdot \left[\left(\gamma_{кр} - \frac{\gamma_{кр} - \gamma_{кр}}{R_* - R_3} R_3 \right) \ln \frac{R_*}{R_{кр}} + 2 \frac{R_* - R_{кр}}{R_* - R_3} (\gamma_{кр} - \gamma_{кр}) \right] = \pi \gamma_0 R_{ом}^2 \sqrt{\frac{g R_{ом}}{2tga}}, \quad (13)$$

где $R_{ом}$ – измененный радиус выпускной трубы бункера при неизменном угле наклонных стенок, обеспечивающий согласованную работу загрузочного бункера с патрубком рецикла.

Отношение (12) к (13) позволяет получить выражение:

$$\frac{R_{он}^{5/2}}{R_{ом}^{5/2}} = \frac{\frac{2\pi H \omega \cdot R_{кр}^2}{(R_{кр} - R_{д})f} \left(\frac{\gamma_{кр} - \gamma_0}{3} R_{кр} + \frac{\gamma_0 R_{д} - \gamma_{кр} R_{д}}{4} \right)}{\left\{ \frac{2\pi H \omega \cdot R_{кр}^2}{(R_{кр} - R_{д})f} \left(\frac{\gamma_{кр} - \gamma_0}{3} R_{кр} + \frac{\gamma_0 R_{д} - \gamma_{кр} R_{д}}{4} \right) + \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \rho \cdot d_r^2 (u_0^2 - 2Rg)}{18\mu} \left[\left(\gamma_{кр} - \frac{\gamma_{кр} - \gamma_{кр}}{R_* - R_3} R_3 \right) \ln \frac{R_*}{R_{кр}} + 2 \frac{R_* - R_{кр}}{R_* - R_3} (\gamma_{кр} - \gamma_{кр}) \right] \right\}}. \quad (14)$$

Таким образом, полученное соотношение (14) позволяет рассчитать радиус трубы модернизированного питателя исходя из конструктивных и технологических параметров дезинтегратора с патрубком рецикла материала. Построим

графическую зависимость соотношения радиусов выпускного отверстия питателя в дезинтеграторе традиционной схемы работы и с патрубком рецикла от радиуса кривизны патрубка рецикла и его диаметра (рис. 2).

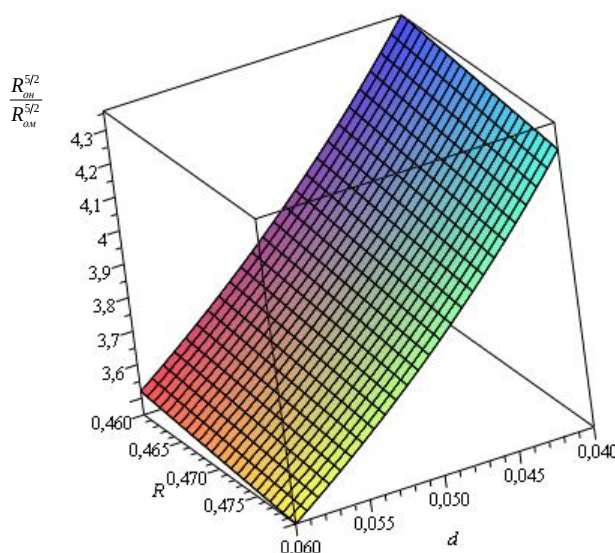


Рис. 2. Зависимость соотношения радиусов выпускного отверстия питателя в дезинтеграторе традиционной схемы работы и с патрубком рецикла от радиуса кривизны патрубка рецикла и его диаметра

Из представленной графической зависимости можно сделать вывод, что с увеличением радиуса кривизны патрубка рецикла и его диаметра соотношение радиусов выпускного отверстия питателя до ввода патрубка рецикла к измененному радиусу уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов В.С, Семикопенко И.А., Воронов В.П. Дезинтеграторы. 2015, 250 с.
2. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В. Математическое описание движения

вязкой среды в патрубке возврата дезинтегратора. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 113–117.

3. Блиничев В.Н., Бобков С.П., Клочков Н.В., Пискунов А.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице. Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 1982. №2. С. 230–232.

4. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В., Фадин Ю.М. Расчет объемного расхода материала через загрузочный бункер дезинтегратора. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 68–70.

Информация об авторах

Семикопенко Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронов Виталий Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Смирнов Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в ноябре 2018 г.

© Семикопенко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В., 2019

^{1,*}**Semikopenko I.A., ¹Voronov V.P., ¹Smirnov D.V.**

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

*E-mail: semikopenko.ia@bstu.ru

THE DESIGN PARAMETERS OF A BOOT NODE OF THE DISINTEGRATOR AT INSTALLATION OF PIPE RECYCLE MATERIAL

Abstract. Currently, disintegrators are equipment used for grinding, mixing and activation of a number of materials. The possibility of obtaining a grinding product with a given granulometric composition is one of the advantages of disintegrators. An experimental unit with a recycling pipe is created to obtain a narrow granulometric composition of the grinding product. It provides unloading of the finished product and returning the grits for additional grinding to the chamber. The branch pipe of the recycle is a rubber-fabric pipe of circular cross-section with a radius of curvature, which ensures the movement of a two-phase medium from the discharge zone to the loading part of the disintegrator. When performing theoretical studies of the grinding process, it is necessary to coordinate the throughput of the loading unit and the node of the disintegrator recycle. In addition, the mass flow rate of the material through the feeder and the mass flow rate of the material (throughput) passing through the rows of percussion elements must be the same for the balanced operation of the disintegrator and the feeder. The mass flow capacity of the coarse material moving in the recycling pipe is determined based on the assumption of the linear nature of the change in bulk density when the material moves inside the recycling pipe. In result of theoretical researches, the analytical expression is received allowing to define a radius of a pipe of the modernized feeder proceeding from constructive and technological parameters of a disintegrator with a branch pipe of a recycle. A calculation scheme for determining the radius of the pipe of an improved disintegrator is presented. The analysis of obtained analytical expression allows to conclude that the radius of the pipe of the modernized unit is associated with the design and technological parameters of the disintegrator.

Keywords: disintegrator, recycling pipe, material.

REFERENCES

1. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Disintegrators [Dezintegratory]. Monograph, 2015, 250 p. (rus)
2. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Smirnov D.V. Mathematical description of the motion of a viscous medium in the disintegrator return pipe [Matematicheskoe opisanie dvizheniya vyazkoj sredy v patrubke vozvrata dezintegratora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 113–117. (rus)
3. Blinichev V.N., Bobkov S.P., Klochkov

N.V., Piskunov A.V. The method of calculating the air flow in a centrifugal impact mill. University news [Metodika rascheta raskhoda vozduha v centrobezhno-udarnoj mel'nice]. Chemistry and Chemical Technology. 1982. No. 2. Pp. 230–232. (rus)

4. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Smirnov D.V., Fadin Yu.M. Calculation of the volume flow of material through the disintegrator feed hopper [Raschet ob'emnogo raskhoda materiala cherez zagruzochnyj bunker dezintegratora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 1. Pp. 68–70. (rus)

Information about the authors

Semikopenko, Igor A. PhD, Assistant professor. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Voronov, Vitaliy P. PhD, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Smirnov, Dmitriy V. Research assistant. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2018

Для цитирования:

Семикопенко И.А., Воронов В.П., Смирнов Д.В. Расчет конструктивных параметров загрузочного узла дезинтегратора при установке патрубка рецикла материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 165–169. DOI: 10.34031/article_5cd6df492da642.78472895

For citation:

Semikopenko I.A., Voronov V.P., Smirnov D.V. The design parameters of a boot node of the disintegrator at installation of pipe recycle material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 165–169. DOI: 10.34031/article_5cd6df492da642.78472895

Научное издание

«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»
№ 5, 2019 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала
Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала
Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка
Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык
Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Сдано в набор 9.04.19. Подписано в печать 15.05.19. Формат 60×84/8
Усл. печ. л. 18,83. Уч.-изд. л. 20,25
Тираж 500 экз. Заказ 54. Цена договорная.
Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк.
Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».

