

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

9

2022

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

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

№ 9, 2022 год

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

Vol. 9. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	15.09.2022
Выход в свет	29.09.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 40 экз. Заказ № 92

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/255810462/
Signed for printing:	15.09.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).

Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Смоляев 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-Берtram, Dr.-Ing., Ваймар (Германия, г. Веймар).

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriya V. 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

Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ПОДЛОЖКИ

8

Васильева Д.В., Попов А.Л., Местников А.Е.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ
ГОРНОГО ПЕСКА НА СВОЙСТВА СУЛЬФАТОСТОЙКОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

17

Толыпина Н.М., Толыпин Д.А.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗЖИЖЕНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ
СУСПЕНЗИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАВ

26

Василькин А.А., Зубков Г.В.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НАВЕСА
ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

34

Медведева О.Н., Чиликин А.Ю.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ
ПО МОДЕРНИЗАЦИИ, КАПИТАЛЬНОМУ РЕМОНТУ И РЕКОНСТРУКЦИИ
ОБЪЕКТОВ СЕТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

50

Цепилова О.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРИ ПОВТОРНОЙ
АДАПТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

63

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Лукин Е.С.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФТОРСИЛИКАТНОГО
СТЕКЛА

77

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Кузьменкова М.С.

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ С ГИБКИМ ВОЛНОВЫМ
РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

88

Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ
ГРАНУЛИРОВАНИЯ

99

Францкевич В.С., Гребенчук П.С., Минченко П.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ШЛИКЕРНОГО
АТОМИЗАТОРА

108

Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК В ДВУСТОРОННИХ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

116

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V. EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF PROTECTIVE AND DECORATIVE COATINGS DEPENDING ON SUBSTRATE POROSITY	8
Vasileva D.V., Popov A.L., Mestnikov A.E. INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF AN ALUMOSILICATE ADDITIVE BASED ON MOUNTAIN SAND ON THE PROPERTIES OF SULFATE-RESISTANT PORTLAND CEMENT	17
Tolypina N.M., Tolypin D.A. INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE LIQUISHING OF CEMENT SYSTEMS WITH THE HELP OF SURFACTANTS	26
Vasilkin A.A., Subkov G.V. PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE CANOPY STRUCTURE BY NUMERICAL METHODS	34
Medvedeva O.N., Chilikin A.Yu. DEVELOPMENT OF ACTIVITIES TO IMPROVE THE SECURITY OF THE GAS DISTRIBUTION NETWORK	50
Tsepilova O.P. RESEARCH OF METHODS FOR DETERMINING A FUNCTION DURING ADAPTIVE REUSE OF INDUSTRIAL COMPLEXES	63

CHEMICAL TECHNOLOGY

Romanenko A.A., Buzov A.A., Chuev V.P., Doroganov V.A., Lukin E.S. COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINOFLUOROSILICATE GLASS	77
---	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Sivachenko L.A., Potapov V.A., Kuzmenkova M.S. MULTIFUNCTIONAL TECHNOLOGICAL APPARATUSES WITH FLEXIBLE WAVE WORKING EQUIPMENT	88
Sevostyanov V.S., Shkarpetkin E.A., Sevostyanov M.V., Babukov V.A. STUDY OF THE CONDITIONS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE GRANULE CHAMBER	99
Franckevich V.S., Grebenchuk P.S., Minchenko P.A. INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL INJECTORS SLIP ATOMIZER	108
Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G. EXPERIMENTAL MEASURES TO IMPROVE THERMAL CHARACTERISTICS IN DOUBLE-SIDED FACE GRINDING MACHINES	116

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-8-16

*Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

*E-mail: loganin@mail.ru

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ПОДЛОЖКИ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос оценки напряженного состояния защитно-декоративных покрытий в зависимости от пористости в зоне контакта «покрытие-подложка». Рассмотрены несколько схем: отсутствие пор, поры заполнены красочным составом, поры не заполнены красочным составом. Для оценки напряженного состояния покрытий применялся программный модуль SCAD Office. Установлено, что наличие пор в зоне контакта приводит к возникновению более неоднородного напряженного состояния. При заполнении поры красочным составом максимальные напряжения в покрытии возникают в зоне контакта покрытия с подложкой. При отсутствии заполнения поры краской максимальные напряжения возникают на поверхности покрытия. Показано, что абсолютная величина напряжений в полимеризвестковых покрытиях больше по сравнению с напряжениями в поливинилацетатцементном покрытии. Выявлено влияние подложки на изменение значений внутренних температурных напряжений. Напряжения в покрытиях на подложке из керамзитобетона значительно ниже по сравнению с применением в качестве подложки тяжелого бетона. Проанализировано соотношение максимальных температурных напряжений и длительной когезионной прочности. Установлено, что в полимеризвестковом покрытии возможно растрескивание от действия температурных напряжений в период с августа до января месяца.

Ключевые слова: покрытия, напряжения, зона контакта, растрескивание, подложка, толщина покрытия.

Введение. Для отделки фасадов зданий широкое распространение получили декоративные сухие строительные смеси, лакокрасочные материалы [1–4]. Несмотря на прогнозируемый длительный срок службы декоративного отделочного слоя, нередко разрушение покрытий наступает раньше вследствие их растрескивания и отслаивания [5–9]. Для оценки трещиностойкости покрытий применяют различные методы. Л.П. Орендлихер, И.П. Новиковой и другими авторами предложено оценивать трещиностойкость по коэффициентам, учитывающим предельную растяжимость и деформацию усадки [10–13].

ГОСТ 29167-91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» описывает методику оценки трещиностойкости композитов, основанную на энергетическом подходе. Для оценки трещиностойкости нашел широкое распространение метод акустической эмиссии [14].

В работе В.В. Шнейдеровой [15] предложена методика оценки трещиностойкости покрытий, заключающаяся в растяжении бетонных образцов с покрытием. За показатель трещиностойкости принимают ширину раскрытия трещины,

предшествующей той, когда было замечено образование первого дефекта в покрытии над трещиной.

В работе [16–18] авторами предложена методика оценки коэффициента трещиностойкости защитно-декоративных покрытий, заключающаяся во внедрении в поверхность покрытия индентора Виккерса и расчете по данным определения размера отпечатка и длины радиальных трещин коэффициента интенсивности напряжений. В работе [19, 20] напряженно-деформированное состояние покрытий в процессе эксплуатации оценивали с помощью голографических методов неразрушающего контроля. Определяют место локализации дефекта по аномалии картины интерференционных полос.

В практике исследовательских работ нашел применение метод оценки трещиностойкости по данным, полученным с помощью программного модуля SCAD Office.

В соответствии с теорией хрупкого разрушения растрескивание покрытий будет происходить, если внутренние растягивающие напряжения σ будут больше или равны когезионной прочности R_p [21]. В случае длительного воздействия напряжений должно выполняться условие:

$$\sigma \geq 0.5R_p. \quad (1)$$

Представляет интерес применение программного модуля SCAD Office для установления закономерностей трещинообразования в зависимости от модуля упругости покрытий и подложки, характера контактной зоны «покрытие-подложка».

Материалы и методы. В качестве подложек рассматривался тяжелый и легкий бетон, характеризующиеся значением модуля упругости, равными соответственно $E=10,0 \cdot 10^3$ МПа и $8,3 \cdot 10^3$ МПа. В качестве красочного состава применяли полимеризованную и поливинилацетатцементную ПВАЦ краски. Значение КЛТР полимеризованного покрытия составляло $3,43 \cdot 10^{-6}$ 1/град, поливинилацетатцементного – $6,67 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Расчеты проводились для условий г. Москвы. Расчет был выполнен с помощью программного модуля SCAD Office. Расчетная модель представляет из себя конечные элементы оболочки с размером $0,1 \times 0,1$ мм. Материал подложки и лакокрасочного покрытия назначался путем присвоения элементу значений модуля упругости, коэффициента Пуассона, а также коэффициента линейного температурного расширения для соответствующего материала. Граничные условия прикладывались к противоположному краю подложки от лакокрасочного слоя и ограничивали перемещения по всем 6 возможным направлениям. Для предотвращения влияния заделки на напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) в лакокрасочном слое и в области контакта с подложкой граничные условия располагались на расстоянии не менее чем 5 толщин лакокрасочного состава. Моделирование пор в подложке выполнялось путем сгущения сетки по окружности. Различный диаметр окружности моделировал различную пористость. Для меньшего влияния краевых напряжений на НДС поры моделировались по центру модели таким образом, чтобы расстояния до края были не менее 2 размеров диаметра поры. Температурное воздействие задавалось как сжимающие или растягивающие усилия, действующие на лакокрасочное покрытие.

Исследования проводились по нескольким схемам (рис. 1), а именно: а – общая схема расчета; тип схемы б – толщина отделочного слоя 1 мм, пора не заполнена; тип схемы с – отсутствие пор в зоне контакта; тип схемы д – толщина отделочного слоя 1 мм, пора заполнена. Для каждой модели были проведены расчеты и получены зна-

чения напряжений, по которым проводился анализ. Для каждого образца намечено по 9 сечений, в которых более подробно рассматривались напряжения.

По всем 9 сечениям строились эпюры σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} . Детальный анализ полученных данных показал, что напряжения распределяются равномерно, изменения напряжений по сечениям в основном происходит в месте контакта подложки и лакокрасочного покрытия. Анализируя распределение напряжений по линиям в области поры, можно увидеть, что напряжения показывают экстремальные значения. Рассмотрены наиболее интересные в плане изменения напряжений сечения – это сечение 2,3 и сечение 1.

Основная часть. Результаты расчета напряжений в покрытиях приведены в табл. 1–2 и на рис. 2–3.

На рис. 2–3 приведены значения напряжений в покрытиях в течение года при наличии сплошного контакта в зоне «покрытие-подложка». Установлено, что напряжения в покрытиях на подложке из керамзитобетона значительно ниже по сравнению с применением в качестве подложки тяжелого бетона. Так, максимальные сжимающие напряжения в поливинилацетатцементном покрытии толщиной 1 мм характерны для ноября и составляют $\sigma_x = -949,92 \cdot 10^{-3}$ МПа, а на подложке из тяжелого бетона – $-1076,68 \cdot 10^{-3}$ МПа (рис. 2). Аналогичные закономерности характерны и для полимеризованного покрытия (рис. 3). Однако, по абсолютной величине напряжения в полимеризованном покрытии значительно больше по сравнению с поливинилацетатцементным покрытием.

С февраля по июль месяц в поливинилацетатцементном покрытии возникают растягивающие напряжения, а в полимеризованном покрытии растягивающие напряжения возникают с июля по январь месяц.

Независимо от вида подложки наблюдается закономерное уменьшение напряжений с уменьшением толщины покрытий. Так, в октябре месяце напряжения в поливинилацетатцементном покрытии (толщина покрытия 1 мм) на керамзитобетонной подложке составляют $-949,92 \cdot 10^{-3}$ МПа, а в покрытии толщиной 0,2 мм – $-299,07 \cdot 10^{-3}$ МПа. На подложке из тяжелого бетона напряжения составляют соответственно $-1076,68 \cdot 10^{-3}$ МПа и $-332,15 \cdot 10^{-3}$ МПа. Аналогичные закономерности характерны и для полимеризованного покрытия.

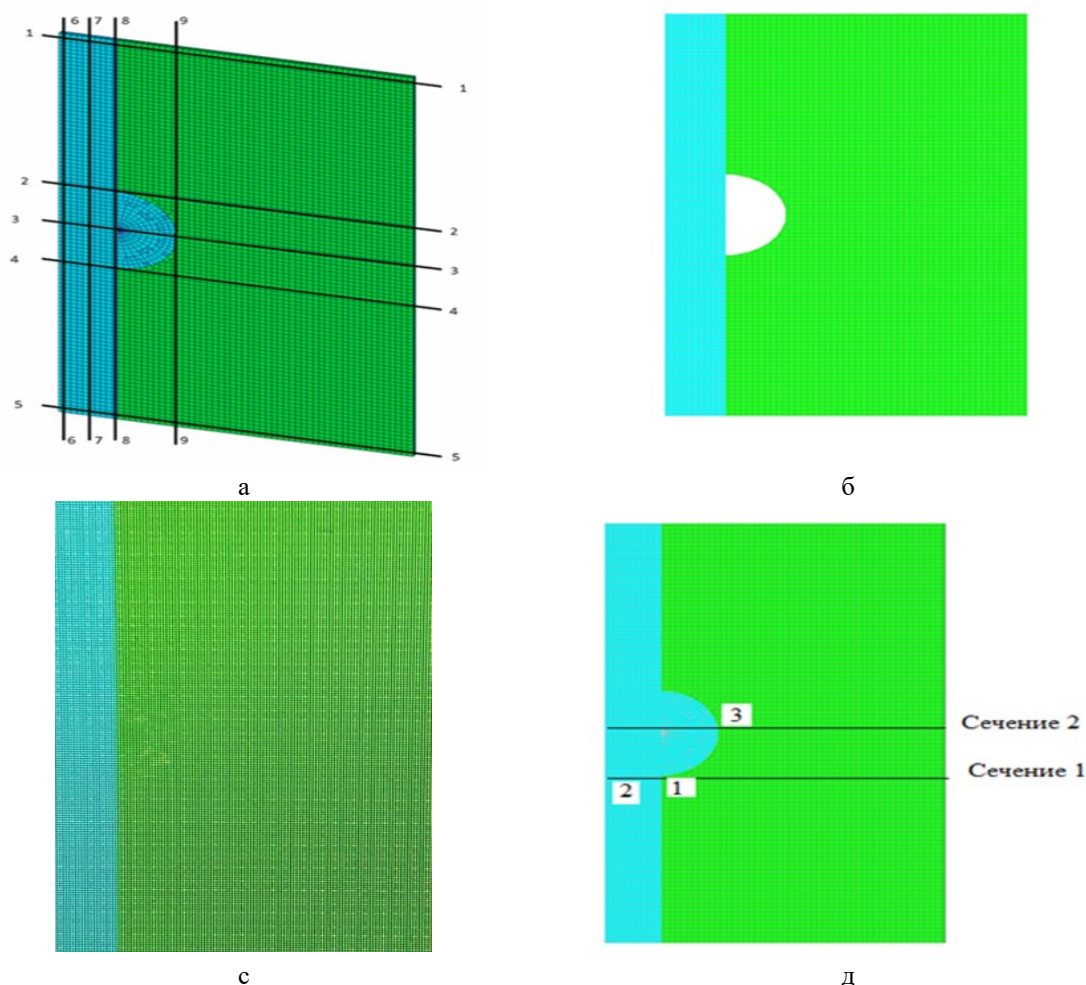


Рис. 1. Схемы расчета напряженного состояния покрытий:
а – схема расчета напряжений; б – пора не заполнена; с – отсутствие пор; д – пора заполнена

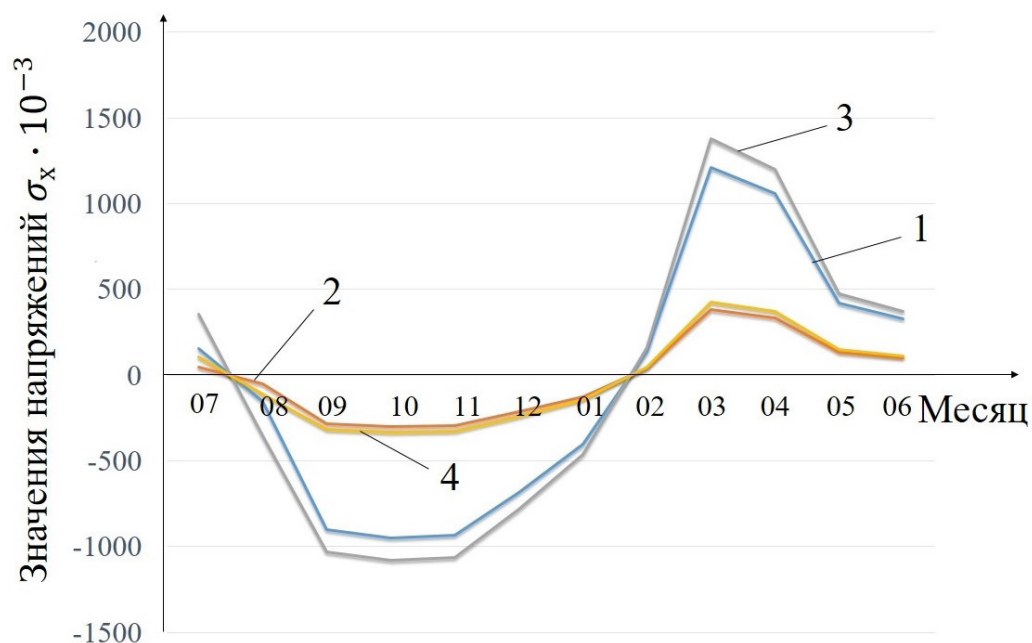


Рис.2. Изменение температурных напряжений в поливинилацетатцементном покрытии в течении года в г. Москве:

- 1 – подложка керамзитобетон, толщина покрытия – 1 мм;
- 2 – подложка керамзитобетон, толщина покрытия – 0,2 мм;
- 3 – подложка тяжелый бетон, толщина покрытия – 1 мм;
- 4 – подложка тяжелый бетон, толщина покрытия – 0,2 мм.

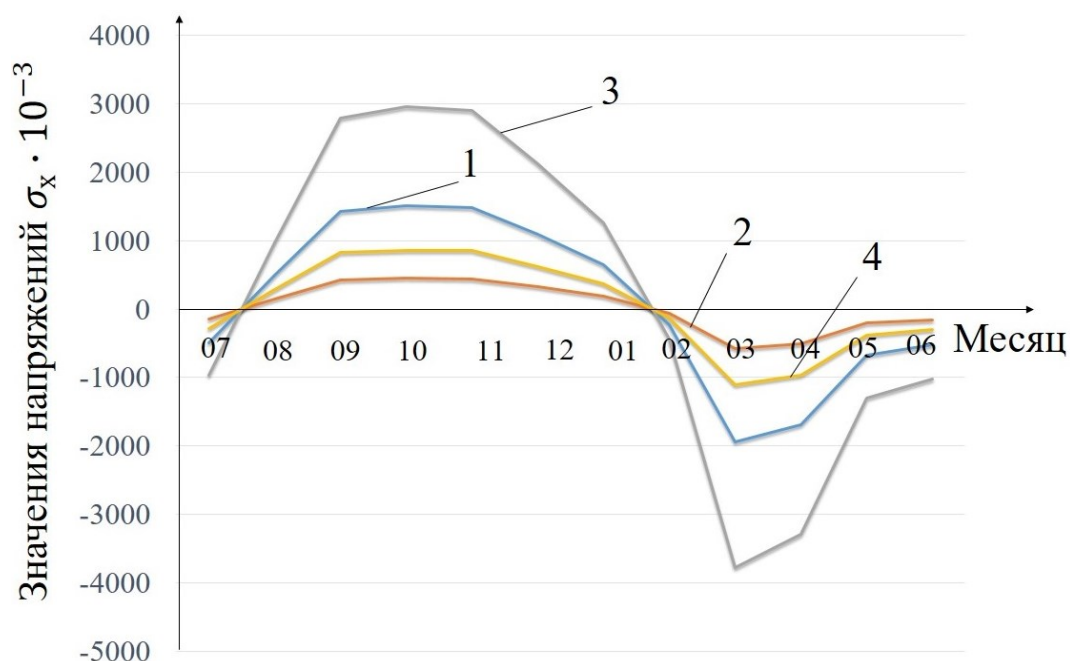


Рис. 3. Изменение температурных напряжений в полимеризвестковом покрытии в течении года в г. Москве:

- 1 – подложка керамзитобетон, толщина покрытия – 1 мм;
- 2 – подложка керамзитобетон, толщина покрытия – 0,2 мм;
- 3 – подложка тяжелый бетон, толщина покрытия – 1 мм;
- 4 – подложка тяжелый бетон, толщина покрытия – 0,2 мм

Таблица 1

**Напряжения в ПВАЦ покрытия толщиной 1 мм
(условия эксплуатации г. Москва, пора диаметром 1мм)**

Месяц	Напряжения, $\sigma_x \cdot 10^{-3}$, МПа			
	Подложка			
	Керамзитобетон		Тяжелый бетон	
	Пустая пора	Заполненная	Пустая пора	Заполненная
07	148,24	133,13	310,09	277,92
08	-148,45	-133,12	-309,88	-277,89
09	-862,55	-772,09	-899,02	-805,89
10	-906,57	-812,01	-947,01	-847,66
11	-891,76	-798,74	-929,65	-833,68
12	-654,19	-585,74	-682,16	-611,41
01	-384,95	-346,07	-403,13	-361,31
02	133,98	119,83	139,48	125,04
03	1164,24	1038,36	1212,95	1083,61
04	1011,27	905,19	1052,4	944,71
05	400,75	359,35	417,93	375,15
06	312,09	279,54	325,4	291,82

Таблица 2

**Напряжения в полимеризвестковом покрытии толщиной 1 мм
(условия эксплуатации г. Москва, пора диаметром 1мм)**

Месяц	Напряжения, $\sigma_x \cdot 10^{-3}$, МПа			
	Подложка			
	Керамзитобетон		Тяжелый бетон	
	Пустая пора	Заполненная	Пустая пора	Заполненная
07	-380,56	-399	-690,23	-810,92
08	380,58	400,56	691,25	804,7
09	1103,55	1159,94	2001,56	2337,79
10	1158,57	1221,83	2109,1	2459,85
11	1141,1	1199,78	2079,75	2422,77
12	336,59	883,41	1521,26	1768,85
01	495,22	519,17	898,46	1045,85
02	-170,41	-180	-311,19	-362,97
03	-1487,74	-1558,3	-2696,99	-3153,93
04	-1295,3	-1362,03	-2346,87	-2735,76
05	-513,26	-543,47	-931,49	-1085,74
06	-400,49	-420,71	-725,64	-844,68

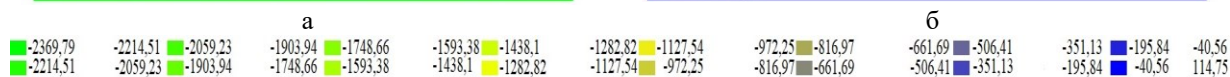
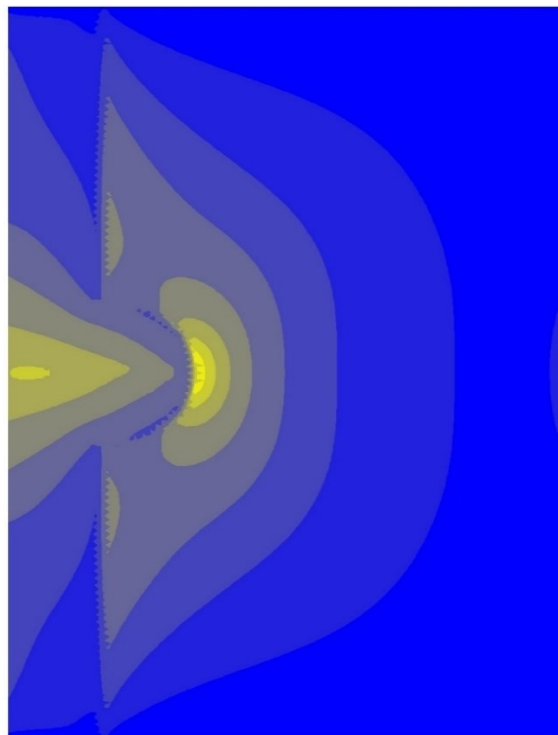
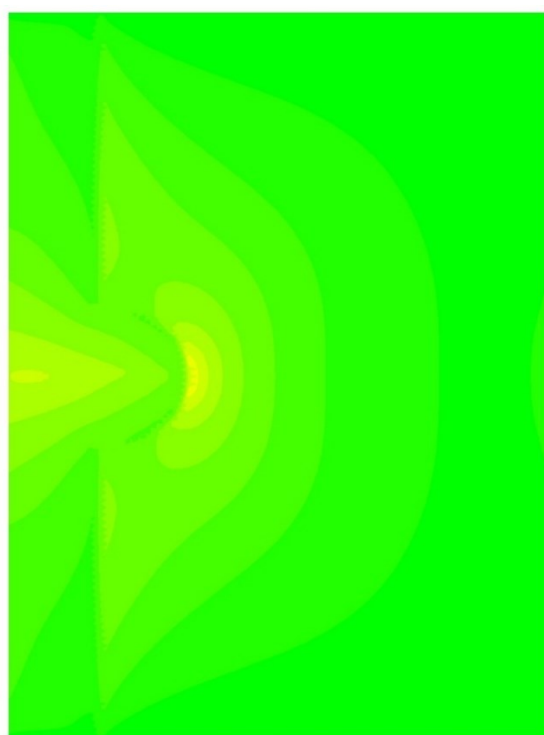


Рис. 4. Изополя распределение напряжений $\sigma_x \cdot 10^{-3}$, МПа, в поливинилацетатцементном покрытии над порой, заполненной красочным составом для условий г.Москвы :

а – в марте месяце; б – в ноябре месяце; подложка тяжелый бетон, толщина покрытия 1 мм, радиус пор 1 мм

При наличии в зоне контакта «покрытие-подложка» пор возникает более неоднородное напряженное состояние (табл. 1, 2, рис. 4). Максимальные напряжения возникают в период сентябрь-ноябрь-месяце и март-апреле-месяце. Так, в ноябре месяце сжимающие напряжения σ_x в ПВАЦ покрытии на керамзитобетонной подложке (пора не заполнена красочным составом) составляют $\sigma_x = -906,57 \cdot 10^{-3}$ МПа, в марте месяце возникают растягивающие напряжения, составляющие $+1164,24 \cdot 10^{-3}$ МПа (табл. 1). Если пора заполнена красочным составом, то значения напряжений в сечении 1, точка 1 составляют соответственно $-812,01 \cdot 10^{-3}$ МПа и $1038,36 \cdot 10^{-3}$ МПа. При применении подложки из тяжелого бетона напряжения увеличиваются и составляют в ноябре месяце (пора не заполнена красочным составом, сечение 1, точка 1) $\sigma_x = -947,01 \cdot 10^{-3}$ МПа, а в случае заполнения краской поры – $-847,66 \cdot 10^{-3}$ МПа.

Для полимеризвестковых покрытий характерно наличие растягивающих напряжений с августа по январь месяц. В ноябре месяце напряжения в покрытии на керамзитобетоне (пора не заполнена красочным составом, сечение 1, точка 1) составляют $+1158,57 \cdot 10^{-3}$ МПа, а при заполнении краской поры – $+1221,83 \cdot 10^{-3}$ МПа (табл. 2). Для весеннего периода для полимеризвестковых покрытий характерно возникновение сжимающих напряжений.

На рис. 4 приведены изополя распределения напряжений σ_x в поливинилацетатцементном (ПВАЦ) покрытии над порой, заполненной красочным составом для условий г. Москвы в марте и ноябре месяце (подложка тяжелый бетон, толщина покрытия 1 мм, радиус пор 1 мм). Видна концентрация сжимающих напряжений, равных $-833,68 \cdot 10^{-3}$ МПа, в зоне контакта краски с подложкой.

Анализ данных, представленных на рис. 4, свидетельствует о том, что концентрация напряжений происходит в зоне наличия поры, причём концентрация напряжения распространяется на величину, равную 1,2–1,5 размера поры. Также можно заметить, что концентрация напряжения возникает в месте контакта подложки и ПВАЦ краски. Таким образом, можно утверждать, что механизм разрушения адгезионных связей начинается в месте контакта поры и ПВАЦ покрытия и распространяется как по толщине, так и вдоль покрытия на величину, равную 1,2–1,5 размера поры. Данные концентрации зависят только от размера поры и не зависят от напряженно-дефор-

мированного состояния (НДС). Выявленные зависимости будут описаны отдельно в будущих работах.

Анализ данных, представленных в табл. 1, 2, свидетельствует, что растрескивание ПВАЦ покрытий от действия температуры наблюдаться не будет, так как длительная когезионная прочность ПВАЦ составляет 0,225 МПа [22]. В полимеризвестковом покрытии возможно образование трещин, длительная когезионная прочность полимеризвесткового покрытия составляет 0,065 МПа. Из этого следует, что выбор лакокрасочных составов для отделки должен осуществляться с учетом коэффициента линейного температурного расширения и упругих свойств покрытий на его основе, а также вида подложки, условий эксплуатации.

Выводы. В ходе экспериментальных исследований установлено, что при наличии в зоне контакта «покрытие-подложка» пор возникает более неоднородное напряженное состояние. При заполнении поры красочным составом максимальные напряжения в покрытии возникают в зоне контакта покрытия с подложкой. При отсутствии заполнения поры краской максимальные напряжения возникают на поверхности покрытия. При применении подложки из тяжелого бетона напряжения увеличиваются по сравнению с применением керамзитобетона. Установлено влияние масштабного фактора на величину температурных напряжений. Проанализирована вероятность растрескивания покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина В.И., Петухова Н.А., Горбунов В.Н., Дмитриева Т.Н. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья // Известия высших учебных заведений. строительство. 2009. №9. С. 36–39.
2. Логанина В.И., Макарова Л.В. Штукатурные составы для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей // Региональная архитектура и строительство. 2009. №1. С. 38–40.
3. Idumah C.I., Obele C.M., Obumneme E.E., Hassan A. Recently Emerging Nanotechnological Advancements in Polymer Nanocomposite Coatings for Anti-corrosion, Anti-fouling and Self-healing // Surfaces and Interfaces. 2020. Vol. 21. 100734. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100734.
4. Китайчик Ф. Силикатные фасадные краски: состав и строение (обзор литературы) // Лакокрасочные материалы и их применение. 2008. № 3. С. 18–21.

5. Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. Москва: изд-во Химия, 1980. 216 с.
6. Martirosyan A.H., Stepanyan T.R., Buloyan, H.A. Investigation of structural changes of paint-and-varnish copolymers under influence of ageing // Journal of Contemporary Physics. 2012. №47(1). Pp. 44–46. doi: 10.3103/S1068337212010100.
7. Zayed A., Garbatov Y., Guedes Soares, C. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions // Ocean Engineering. 2018. Vol. 163. Pp. 299–306. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.047.
8. Eduok, U., Faye, O., Szpunar, J. Recent developments and applications of protective silicone coatings: A review of PDMS functional materials // Progress in Organic Coatings. 2017. Vol. 111. Pp. 124–163. doi: 10.1016/j.porgcoat.2017.05.012.
9. Сухарева Л.А. Долговечность полимерных покрытий. Москва: Химия, 1984. 240 с.
10. Василик П.Г., Голубев И.В. Трещины в штукатурках // Строительные материалы. 2003. №4. С. 14–16.
11. Дюрягина А.Н., Демьяненко А.В., Болатбаев К.Н. Применение графического редактора Adobe Photoshop для определения сплошности покрытий // Промышленная окраска. 2003. №4. С. 30–33.
12. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин В.И., Воронин В.В., Алимов Л.А., Новикова И.П. Состав, структура и свойства цементных бетонов. Москва: Стройиздат 1976. 144 с.
13. Логанина В.И., Макридин Н.И., Макарова Л.В., Карпов В.Н. Оценка трещинообразования покрытий с помощью метода акустической эмиссии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 6 (534). С. 35–38.
14. Шнейдерова В.В. Антикоррозийные лакокрасочные покрытия. Москва: Стройиздат, 1982. 132 с.
15. Эванс А.Г., Лэндон Т.Г. Конструкционная керамика. Москва: Металлургия, 1980. 255 с.
16. Loganina V.I., Makarova L.V. Technique of the assessment of crack resistance of the protective decorative coatings // Contemporary Engineering Sciences. 2014. Т. 7. № 33–36. Pp. 1967–1973. doi: 10.12988/ces.2014.411239.
17. Логанина В.И., Волков И.В., Голубев В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 7 (595). С. 26–30.
18. Szociński M., Darowicki K. Performance of organic coatings upon cyclic mechanical load // Progress in Organic Coatings. 2020. Vol. 146. 105718. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105718.
19. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. Москва, Ленинград: Химия, 1964. 388 с.
20. Логанина В.И. Прогнозирование растрескивания полимерных покрытий бетонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1996. №9. С. 14–16.

Информация об авторах

Логанина Валентина Ивановна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства». E-mail: loganin@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28.

Светалкина Мария Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства». E-mail: adikaevka_01@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28.

Арискин Максим Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: m.v.ariskin@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28.

Поступила 13.05.2022 г.

© Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В., 2022

***Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V.**
Penza State University of Architecture and Construction
**E-mail: loganin@mail.ru*

EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF PROTECTIVE AND DECORATIVE COATINGS DEPENDENT ON SUBSTRATE POROSITY

Abstract. The issue of assessing the stress state of protective and decorative coatings, depending on the porosity in the contact zone "coating-substrate" is considered. Several schemes are considered: the absence of pores, the pores are filled with a paint composition, the pores are not filled with a paint composition. To

assess the stress state of the coatings, the SCAD Office software module is used. It has been established that the presence of pores in the contact zone leads to the appearance of a more inhomogeneous stress state. When a pore is filled with a paint composition, the maximum stresses in the coating occur in the zone of contact between the coating and the substrate. In the absence of filling the pores with paint, the maximum stresses occur on the surface of the coating. The influence of the substrate on the change in the values of internal thermal stresses is revealed. Stresses in coatings on a claydite-concrete substrate are significantly lower compared to the use of heavy concrete as a substrate. The ratio of maximum thermal stresses and long-term cohesive strength is analyzed. It is established that cracking is possible in the polymer lime coating from the action of temperature stresses in the period from August to January.

Keywords: coatings, stresses, contact zone, cracking

REFERENCES

1. Loganina V.I., Petukhova N.A., Gorbunov V.N., Dmitrieva T.N. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials [Pe/rspektivy izgotovleniya organo-mineral'noj dobavki na osnove otechestvennogo syr'ya]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. stroitel'stvo*. 2009. No. 9. Pp. 36–39 (rus)
2. Loganina V.I., Makarova L.V. Plaster compositions for restoration work using colored fillers [Shtukaturnye sostavy dlya restavracionnykh rabot s primeneniem okrashennykh napolnitelej]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No. 1. Pp. 38–40 (rus)
3. Idumah C.I., Obele C.M., Obumneme E.E., Hassan A. Recently Emerging Nanotechnological Advancements in Polymer Nanocomposite Coatings for Anti-corrosion, Anti-fouling and Self-healing Surfaces and Interfaces. 2020. Vol. 21. 100734. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100734.
4. Kitaichik F. Silicate facade paints: composition and structure (literature review) [Silikatnye fasadnye kraski: sostav i stroenie (obzor literatury)]. *Lakokrasochnye materialy i ih primeneniye*. 2008. No. 3. Pp. 18–21 (rus)
5. Karyakina M.I. Physico-chemical foundations of the processes of formation and aging of coatings [Fiziko-himicheskie osnovy processov formirovaniya i stareniya pokrytij]. Moskva: izd-vo Himiya, 1980. 216 p. (rus)
6. Martirosyan A.H., Stepanyan T.R., Buloyan H.A. Investigation of structural changes of paint-and-varnish copolymers under influence of ageing. *Journal of Contemporary Physics*. 2012. No. 47(1). Pp. 44–46. doi: 10.3103/S1068337212010100.
7. Zayed A., Garbatov Y., Guedes Soares C. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 163. Pp. 299–306. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.047.
8. Eduok U., Faye O., Szpunar J. Recent developments and applications of protective silicone coatings: A review of PDMS functional materials. *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 111. Pp. 124–163. doi: 10.1016/j.porgcoat.2017.05.012.
9. Sukhareva L.A. Durability of polymer coatings [Dolgovechnost' polimernykh pokrytij]. Moskva: Himiya, 1984. 240 p. (rus)
10. Vasilik P.G., Golubev I.V. Cracks in plasters [Treshchiny v shtukaturkah]. *Stroitel'nye materialy*. 2003. No. 4. Pp. 14–16. (rus)
11. Dyuryagina A.N., Demyanenko A.V., Bolatbaev K.N. Application of the Adobe Photoshop graphics editor to determine the continuity of coatings [Primenenie graficheskogo redaktora Adobe Photoshop dlya opredeleniya sploshnosti pokrytij]. *Promyshlennaya okraska*. 2003. No. 4. Pp. 30–33. (rus)
12. Gorchakov G.I., Orentlicher L.P., Savin V.I. Composition, structure and properties of cement concretes [Sostav, struktura i svoystva cementnykh betonov]. Moskva: Strojizdat, 1976. 144 p. (rus)
13. Loganina V.I., Makridin N.I., Makarova L.V., Karpov V.N. Estimation of cracking of coatings using the method of acoustic emission [Ocenka treshchinoobrazovaniya pokrytij s pomoshch'yu metoda akusticheskoy emissii]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2003. No. 6 (534). Pp. 35–38. (rus)
14. Shneiderova V.V. Anti-corrosion paint coatings [Antikorroziynye lakokrasochnye pokrytiya]. Moskva: Strojizdat, 1982. 132 p. (rus)
15. Evans A.G., Landon T.G. Structural ceramics [Konstrukcionnaya keramika]. Moskva: Metallurgiya, 1980. 255p (rus)
16. Loganina V.I., Makarova L.V. Technique of the assessment of crack resistance of the protective decorative coatings: Contemporary Engineering Sciences. 2014. Vol. 7. No. 33–36. Pp. 1967–1973. doi:10.12988/ces.2014.411239
17. Loganina V.I., Volkov I.V., Golubev V.V. Evaluation of the stress-strain state of the paint coating depending on the quality of its appearance [Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya lakokrasochnogo pokrytiya v zavisimosti ot kachestva ego vneshnego vida]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2008. No. 7 (595). Pp. 26–30. (rus)

18. Szociński M., Darowicki K. Performance of organic coatings upon cyclic mechanical load. Progress in Organic Coatings. 2020. Vol.146. 105718. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105718

19. Bartenev G.M., Zuev Yu.S. Strength and fracture of highly elastic materials [Prochnost' i

razrushenie vysokoelasticheskikh materialov]. Moskva, Leningrad: Himiya, 1964. 388 p.(rus)

20. Loganina V.I. Prediction of cracking of polymeric coatings of concrete [Prognostirovanie rastreskivaniya polimernih pokritii betonov]. Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Stroitelstvo.1996. No.9. Pp. 14–16 (rus)

Information about the authors

Loganina, Valentina I. DSc, Professor, Head of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production. E-mail: loganin@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

Svetalkina, Maria A. PhD, Assistant professor of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production. E-mail: adikaevka_01@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

Ariskin, Maxim V. PhD, Assistant professor of the Department of Building Structures. E-mail: m.v.ariskin@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, st. G. Titova, 28.

Received 13.05.2022

Для цитирования:

Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В. Оценка трещиностойкости защитно-декоративных покрытий в зависимости от пористости подложки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-8-16

For citation:

Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V. Evaluation of crack resistance of protective and decorative coatings depending on substrate porosity. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-17-25

Васильева Д.В., *Попов А.Л., Местников А.Е.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

*E-mail: omsvdy2910@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ГОРНОГО ПЕСКА НА СВОЙСТВА СУЛЬФАТОСТОЙКОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Аннотация. В работе обоснована эффективность и перспективность исследований в направлении разработки активной минеральной добавки на основе горного песка Якутии для общестроительных цементов с целью повышения его сульфатостойкости. Это позволит расширить спектр применения портландцементов, работающих в условиях сульфатной агрессии. Республика Саха (Якутия) располагает множеством месторождений природных песков алюмосиликатного состава или так называемых «горных песков». Одним из крупных и разработанных карьеров горных песков в Якутии является месторождение «Кильдямское», областями применения которого на сегодня являются основания и подстилающие покрытия дорог. В работе показана возможность получения активной минеральной добавки на основе данного песка. Изучено влияние дозировки и уровня дисперсности добавки на прочностные характеристики цементов и на коэффициент сульфатостойкости. Введение активной минеральной добавки на основе песка кильдямского месторождения до 15 % взамен цемента, незначительно снижает прочность при сжатии цементного камня в диапазоне 3–7 % с сохранением марочной прочности. Введение добавки свыше 15 % снижает прочность при сжатии цемента в среднем на 20 %, марочная прочность при сжатии уже не соблюдается, при этом гидратационные процессы замедляются, и с течением времени в сульфатной среде прочность на сжатие образцов сначала растет, а затем снова падает. В результате работы предложена активная минеральная добавка на основе песка кильдямского месторождения в цемент, придающая стабильный коэффициент сульфатостойкости, равный 0,95 с сохранением марочной прочности и гидратационных процессов.

Ключевые слова: портландцемент, алюмосиликатная добавка, горный песок кильдямского месторождения, сульфатостойкость.

Введение. В условиях вечной мерзлоты строительство зданий и сооружений производится на свайных фундаментах, в некоторой степени из-за засоленности и засульфаченности почв снижается и срок эксплуатации объектов, что приводит к обязательному проведению работ по усилению несущей способности конструкций зданий. Именно на территории Республики Саха (Якутия) существует данная проблема, в частности, она осложняется еще и дороговизной, и сложностью не только доставки материалов, но и самих работ, что затрудняет обслуживание эксплуатируемых объектов. Так же это сказывается и на скорости проводимых работ. Коррозия железобетонных конструкций происходит вследствие воздействия агрессивных веществ атмосферы и частых циклов заморозки-оттаивания и суровых климатических условий Крайнего Севера. Исходя из литературных данных о коррозии цементного камня в агрессивных средах и требованиям стандартов различных стран к специальным низкоалюминатным коррозионно-стойким цементам, следует вывод, что для производства таких цементов подходит использование сырьевых материалов, содержащих небольшие количества Al_2O_3 , а при использовании активных минеральных добавок необходимо максимальное связывание клинкерных минералов.

Косвенным определением степени активности минеральной добавки будет соблюдение условия, при котором процент падения прочности цемента ниже процента объема вводимой добавки. При отсутствии материалов с низким содержанием алюминатов следует вводить в состав цементов связующие с определенным содержанием кремнезема для корректировки составов кремнеземсодержащих связующих. Итак, даже для мало алюминатных цементов, чтобы повысить их сульфатостойкость необходимо связать весь минерал C_3A , который содержится в цементе, в гидросульфоалюминат. Значит, необходимо обязательно учитывать следующие параметры цемента: тонкость помола, дозировку гипса, минеральные и органические добавки в смеси и режим твердения [1–4].

В современной науке активно развивающимся направлением являются композиционные вяжущие с применением различных минеральных добавок на основе природного сырья [5–8].

Исходя из этого нами предлагается к рассмотрению применение активной минеральной добавки на основе горных песков Якутии для общестроительных цементов с целью повышения его сульфатостойкости, что позволит расширить области применения портландцементов с заданными физико-механическими свойствами для бетонов в условиях сульфатной агрессии [9].

Проблема создания энергоэффективных строительных материалов остается актуальной всегда, и не только из-за роста цен на сырьевые материалы и энергоносители, но и из-за повышения требований по энергосбережению, предъявляемых к эксплуатируемым зданиям и сооружениям [10–12]. Для мощнейшего подъема строительства как отрасли в нашей республике требуется решение данной проблемы, в ходе которой так же будут рассмотрены перспективы освоения одной из главных сырьевых баз местного сырья – горных песков, позволяющих использовать в качестве заполнителей и активных добавок ценное минеральное сырье [13].

Республика Саха (Якутия) располагает множеством месторождений природных песков алюмосиликатного состава или так называемых «горных песков». Особенностью данных песков является полифракционный состав с широким диапазоном фракций: от обломков до пылевидных и глинистых частиц размерностью менее 0,16 мм. Такая особенность песков затрудняет их использование в качестве мелкого заполнителя [14]. Однако на сегодня уделено мало внимания возможности применения горных песков Якутии в качестве активных минеральных добавок. Одним из крупных и разработанных карьеров в Якутии является месторождение «Кильдямское», горные пески которого применяются в качестве инертного сырья в устройстве грунтовых оснований зданий, оснований и покрытий автомобильных дорог, пристроечных площадок, перронов и др.

Методика. Основные физико-механические характеристики цемента и песка определялись методами испытаний, приведенных и регламентируемых межгосударственными стандартами.

Оптимизация составов сульфатостойкого портландцемента проводилась по методу математического планирования. Исходя из принципа действия этого метода определяется девять основных составов, в которых варьируются два показателя. Так как данный модифицированный материал в своем составе содержит три компонента: портландцемент, активную минеральную добавку в виде тонкомолотого песка и суперпластификатор, в расчетах по оптимизации состава за первую переменную принимаем количество вводимой добавки, за вторую переменную – дисперсность добавки, определяемую удельной поверхностью. Результаты описывали через уравнение регрессии (1) с коэффициентом корреляции не менее 0,9.

$$f = y_0 + a \times x + b \times y + c \times x^2 + d \times y^2 \quad (1)$$

Для оценки коррозионной стойкости образцов цемента, изготовленных с активной минеральной добавкой на основе песка, определяли коэффициент сульфатостойкости.

Коэффициент сульфатостойкости (КС) представляет собой отношение предела прочности при сжатии после выдержки выбранного образца в коррозионной среде в течение определенного промежутка времени, к прочности образца после твердения в нормальных условиях в течение 28 суток. Расчет КС проводят по формуле:

$$КС_n = \frac{R_n}{R_{28}} \quad (2)$$

где $КС_n$ – коэффициент сульфатостойкости на n -ые сутки;

R_n – прочность на сжатие образца, выдержанного в коррозионной среде n суток, МПа;

R_{28} – прочность на сжатие образца после твердения в течение 28 суток в нормальных условиях, МПа.

Исследуемый цемент следует рассматривать как сульфатостойкий, если изготовленные образцы имеют $КС \geq 0,8$.

Основная часть. В работе использовались портландцемент марки ЦЕМ I 32,5Н производства ОАО «Якутцемент» (таблица 1), пластифицирующая добавка Полипласт СП-1 производства ООО «ПолипластХИМ», горный песок месторождения «Кильдямское» (карьер в 35 км от Якутска).

Исходным материалом для образования горелых пород служат так называемые пустые шахтные породы или межугольные сланцы, сопровождающие угольные напластования. Минералогический состав этих пород характеризуется присутствием сланцевых аргиллитов, алевролитов и песчаников, смешанных в различных соотношениях. В том случае, если горение (или самообжиг) межугольных сланцев происходило в недрах земли, иногда под большим давлением толщи вышележащих слоев, горелые породы носят название природных или естественных горелых пород.

Кильдямское месторождение разбито на два участка.

Первый участок расположен на пяти сопках. Крутизна склонов колеблется от 10 до 45°. Высота сопки – от 40 до 50 метров. К склонам сопки приурочены выходы и обнажения горелых пород.

Второй участок, находящийся в одном километре от первого, также расположен на склонах сопки. Высота сопки достигает 50–60 метров. Крутизна склонов колеблется в пределах от 15 до 45°.

Различия структуры и состава первоначальных пород и разная степень обжига обуславливают наличие на месторождении целого ряда разновидностей горелых пород.

При разбивке на четыре разновидности было установлено следующее:

Проба №1. Оранжевая и светло-красная слабо обожженная горелая порода, напоминающая собой недожженный кирпич. Объемный вес отдельных образцов этой пробы колеблется в пределах от 1,66 г/см³ до 1,78 г/см³. В общей пробе эта разновидность содержится в количестве 10–15 %.

Проба №2. Темно-красная и буро-красная нормально обожженная порода, напоминающая собой хорошо обожженный кирпич. Объемный вес отдельных образцов этой пробы колеблется в пределах от 1,67 г/см³ до 1,80 г/см³. В общей пробе эта разновидность содержится в количестве 20–25 %.

Проба №3. Темно-красная и буро-красная с темно-серыми и черными разностями сильно обожженная порода. Объемный вес отдельных образцов этой пробы колеблется в пределах от 1,42 г/см³ до 1,53 г/см³. В общей пробе эта разновидность составляет основную массу, и ее содержание доходит до 50–60 %.

Проба №4. Пестрая обожженная до вспучивания шлакообразная порода. В пестрой раскраске породы преобладают цвета: черный, серый и кремово-желтый. Объемный вес отдельных образцов колеблется в пределах от 0,93 г/см³ до 1,30 г/см³. Содержание этой разности в общей пробе определяется в 15–20 %. В таблице 1 приведен химический состав всех проб месторождения. На рисунке 1 приведен внешний вид пробы 1, используемой в данной работе.

Далее в таблице 2 приведены свойства используемого в данной работе вяжущего вещества производства ОАО «Якутцемент».

Таблица 1

Химический состав горелых пород Кильдямского месторождения

Наименование проб	Содержание, %							Щелочи
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	П.п.п.	
Проба №1.	64,89	20,03	5,02	1,57	1,43	0,45	1,23	5,41
Проба №2.	65,74	19,42	7,97	0,96	1,64	0,34	1,16	2,77
Проба №3.	63,23	20,19	7,58	1,45	1,57	0,56	1,25	4,17



Рис. 1. Внешний вид песка Кильдямского месторождения

Таблица 2

Свойства портландцемента марки ЦЕМ I 32,5Н

Показатель	Значение
Нормальная плотность, %	25
Остаток на сите 008, %	7,0
Равномерность изменения объема, мм	0,11
Сроки схватывания:	
– начало, час:мин	2:35
– окончание, час:мин	3:55
Средняя активность цемента в возрасте 28 сут., МПа	40,95

Проведены основные испытания для определения физико-механических характеристик природного песка. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Исходя из полученных характеристик песок месторождения «Кильдямское» при зерновом со-

ставе и модуле крупности характерном для песков средней размерности, отличается высоким содержанием зерен менее 0,16 мм пылевидных и глинистых включений, что относит его к мелким пескам.

Таблица 3

Физико-механические характеристики природного песка

Месторождение	Кильдямское
Зерновой состав(полные остатки на ситах, в %)	
0,16	98,1
0,315	93,6
0,63	65,8
1,25	26,6
2,5	4,7
5	0
Модуль крупности, M_k	2,4
Содержание зерен размером менее 0,16 мм	4,1
Насыпная плотность, кг/м ³	1442,0
Истинная плотность, кг/м ³	2130,0
Содержание пылевидных и глинистых включений	15,3

При разработке активной минеральной добавки на основе песка Кильдямского месторождения в работе за параметры оптимизации были приняты: количество активной минеральной добавки в виде песка Кильдямского месторождения, % взамен цемента и ее дисперсность, определяемая величиной удельной поверхности, м²/кг [15]. Дозировку активной минеральной до-

бавки было решено брать не более 30 %, как регламентирует межгосударственный стандарт на цементы. Дисперсность добавки решено было варьировать в диапазоне удельной поверхности 300–500 м²/кг, так как при дальнейшем помоле происходит торможение роста удельной поверхности, что является не выгодным с точки зрения энергетических затрат (рис. 2).

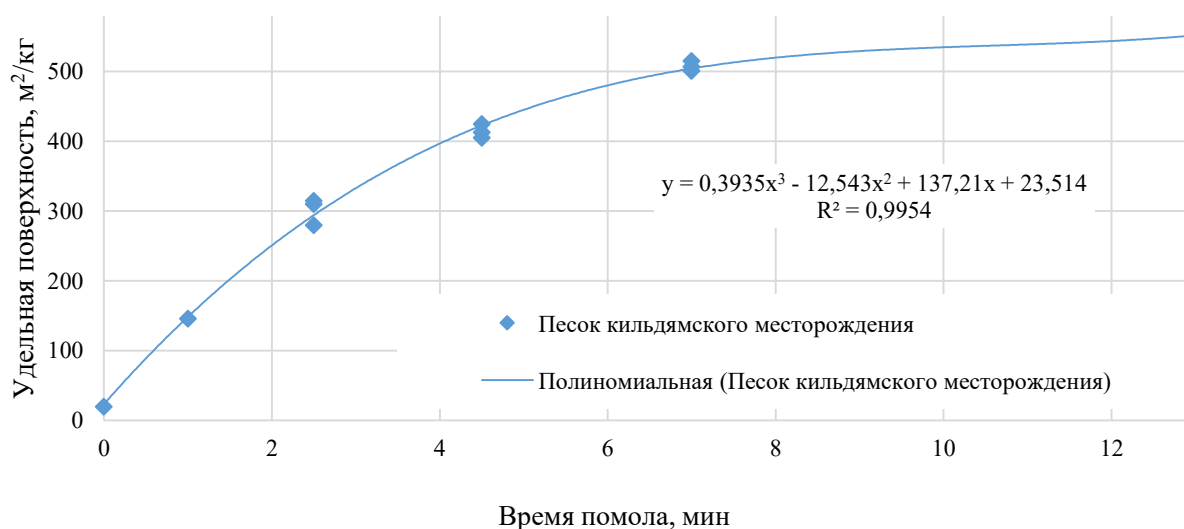


Рис. 2. Кинетика размолоспособности песка Кильдямского месторождения

Дозировка пластификатора принята за 1,5 % от массы цемента, которая определена достиже-

нием предельного значения распыла цементного теста при пошаговом увеличении концентрации пластификатора (рисунок 3) [16].

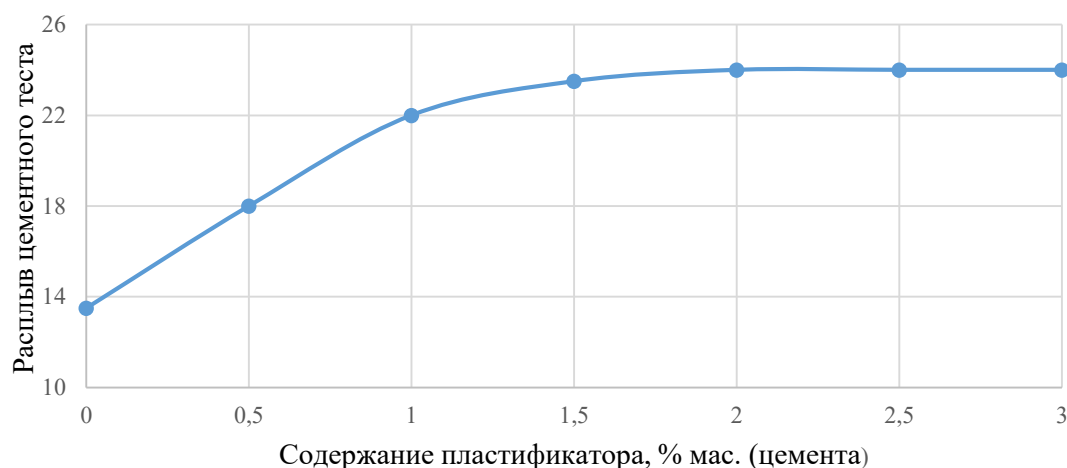


Рис. 3. Зависимость распыла цементного теста от дозировки пластификатора

На основе выбранных варьируемых факторов (табл. 4) составлен план полнофакторного эксперимента (табл. 5). Согласно матрице планирования, были составлены соответствующие со-

ставы, получены образцы и испытаны их основные физико-механические характеристики (табл. 6). При этом данные были получены для образцов в возрасте 28 и 56 суток.

Таблица 4

Условия планирования эксперимента для разработки составов сульфатостойкого цемента

Факторы		Варьирование факторов			Интервалы варьирования
Вид (натуральный)	Вид (кодированный)	-1	0	+1	
Содержание добавки, %	X	0	15	30	15
Удельная поверхность, м ² /кг	Y	300	400	500	100

Таблица 5

Матрица планирования

№ точки плана	Факторы			
	X	Y	Содержание добавки, %	Удельная поверхность, м ² /кг
1	-1	-1	0	300
2	0	-1	15	300
3	+1	-1	30	300
4	-1	0	0	400
5	0	0	15	400
6	+1	0	30	400
7	-1	+1	0	500
8	0	+1	15	500
9	+1	+1	30	500

Таблица 6

Основные физико-механические характеристики сульфатостойкого цемента

№ точки плана	Сроки схватывания		Нормальная густота	Прочность на сжатие, МПа	Коэффициент сульфатостойкости в 28-суточном возрасте	Коэффициент сульфатостойкости в 56-суточном возрасте
	Начало	Конец				
1	170	290	26,37	33,23	0,83	0,79
2	190	280	24,50	33,21	0,95	0,85
3	170	320	22,25	28,51	1,02	0,90
4	170	290	26,37	33,23	0,83	0,79
5	210	300	25,00	32,52	0,95	0,94
6	210	320	22,75	28,68	1,04	0,96
7	170	290	26,37	33,23	0,83	0,79
8	220	310	25,50	32,43	0,98	0,91
9	230	320	23,00	30,36	1,10	0,94

Результаты испытаний для цемента с активной минеральной добавкой на основе песка кильдямского месторождения представлены в виде уравнений регрессии:

$$f = 0.9772 + 0.0096 \times x - 0.0010 \times y - 0.0000066667 \times x^2 + 0.0000015 \times y^2$$

Коэффициент сульфатостойкости в возрасте 28 суток:

Коэффициент сульфатостойкости в возрасте 56 суток:

$$f = 0.1506 + 0.0107 \times x - 0.0031 \times y - 0.0002 \times x^2 - 0.0000036667 \times y^2$$

На основе уравнений регрессии построены графические зависимости влияния варьируемых факторов на коэффициент сульфатостойкости цемента (рисунок 4).

Анализ уравнений регрессии и построенных поверхностей отклика показал, что максимальное значение коэффициента сульфатостойкости достигается при содержании добавки 30 % и ее удельной поверхности 500 м²/кг в цементном камне – в возрасте 28 суток и при содержании добавки 15 % и удельной поверхности 400 м²/кг в цементном камне – в возрасте 56 суток.

При этом цементный камень после 28 суток в сульфатной среде не подвергается коррозии

при введении добавки более 15 %, а напротив обладает повышенной прочностью при сжатии, что приводит к значению коэффициента сульфатостойкости более единицы. Данный факт наиболее вероятно связан с пущолановым взаимодействием минеральных компонентов песка и портландцемента.

При достижении 56 суток нахождения цементного камня в сульфатной среде активно набранная прочность при сжатии с содержанием добавки 30 % снижается до уровня прочности цементного камня с содержанием добавки 15 %. При этом также вклад удельной поверхности добавки в сульфатостойкость цемента снижается.

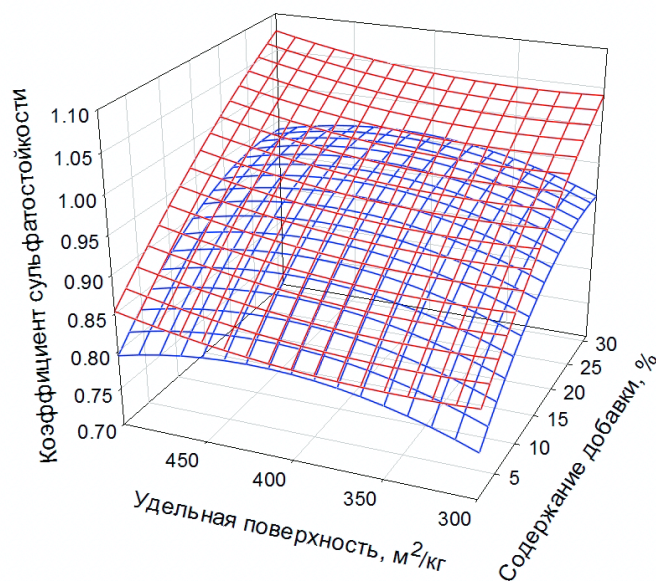


Рис. 4. Зависимости коэффициента сульфатостойкости цемента от дисперсности и содержания активной добавки кильдямского песка: красная поверхность – после 28 суток в сульфатной среде, синяя поверхность – после 56 суток в сульфатной среде

Выводы. Таким образом, разработан состав цемента, обладающий стабильным коэффициентом сульфатостойкости 0,95. Введение активной минеральной добавки на основе песка Кильдямского месторождения до 15% незначительно снижает прочность на сжатие цементного камня в диапазоне 3–7% с сохранением марочной прочности, при этом коэффициент сульфатостойкости после выдержки в сульфатной среде 56 суток снижается менее чем на 5 % по сравнению со значением в возрасте 28 суток. Введение добавки свыше 15 % снижает прочность при сжатии цемента в среднем на 20 %, марочная прочность

при сжатии уже не соблюдается. Коэффициент сульфатостойкости цементного камня с добавкой более 15 % после выдержки в сульфатной среде 28 суток имеет значение выше единицы, что говорит о том, что цемент изначально не набрал 100 % прочность при сжатии и в сульфатной среде продолжались гидратационные процессы. После выдержки образцов в сульфатной среде 56 суток коэффициент сульфатостойкости снижается более чем на 10 % и стремится к значениям равным при дозировке добавки до 15 %.

Исходя из этого наилучшей дозировкой активной минеральной добавки является 15 % взамен цемента с величиной удельной поверхности 400 м²/кг. При данных значениях достигается стабильный коэффициент сульфатостойкости, сохраняется скорость гидратационных процессов и марочная прочность при сжатии цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толыпина Н.М., Щигорева Е.М., Головин М. В., Щигорев Д.С. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем применения активных заполнителей второго типа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №. 2. С. 27–32. doi: 10.12737/article_5c73fb6df9f53.10093605.
2. Толыпина Н.М., Щигорева Е.М., Головин М.В., Щигорев Д.С. Сульфатостойкость бетона на основе химически активного заполнителя из нефелинсодержащих пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №. 10. С. 21–26. doi: 10.12737/article_59cd0c585e1768.86979091.
3. Бердов Г.И., Камха М.А., Парубов А.Г., Себелев И.М. Влияние ультразвуковой активации воды на гидратацию и твердение цемента и трехкальциевого алюмината // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1991. №. 8. С. 53–56.
4. Фролов Н.В. Экспериментальные исследования кинетики развития коррозионных повреждений бетона в изгибаемых железобетонных элементах при силовых и средовых воздействиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №. 2. С. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43>.
5. Borges Marinho A.L., Mol Santos C.M., Franco de Carvalho J.M., Mendes J.C. Ladle furnace slag as binder for cement-based composites // Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers. 2017. №. 11(29). 04017207.
6. Федюк Р.С., Лесовик В.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохин Р.А., Битуев А.В., Заяханов М.Е., Мочалов А.В. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости // Инженерно-строительный журнал. 2019. №. 1(85). С. 28–38. doi:10.18720/MCE.85.3
7. Han F., Zhang H., Pu Sh., Zhang Z. Hydration kinetics of composite binder containing slag at different temperatures // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. №. 2(121). С. 815–827.
8. Banevičienė V., Malaiškienė J., Zach J., Dvorak K. Composite binder containing industrial by-products (Fcccw and psw) and nano SiO₂ // Materials. 2021. № 7(14). 1604
9. Vasileva D., Protodiakonov E., Egorova A., Antsupova S. Modifying admixtures to cement compositions produced from local raw materials // MATEC Web of Conferences. 2018. №. 143. 02006.
10. Alfimova N.I., Gridchin A.M., Glagolev E.S., Lesovik R.V., Levchenko O.V., Pirieva S.I. Effective composite binders // Advances in Engineering Research. Atlantis Press. 2017. Vol. 133. Pp. 42–47.
11. Omrany H., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Raahemifar K., Tookey J. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. №. 62. С. 1252–1269.
12. Wu Y., Wang J.-Y., Monteiro P.J.M., Zhang M.-H. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings // Construction and Building Materials. 2015. №. 87. Pp. 100–112.
13. Fomina E.V., Lesovik V.S., Fomin A.E., Kozhukhova N.I., Lebedev M.S. Quality evaluation of carbonaceous industrial by-products and its effect on properties of autoclave aerated concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2018. №. 4(327). 042033.
14. Vasileva D.V., Fyodorov V.I., Mestnikov A.E. Physical and mechanical properties of granulated foam glass – Foam zeolite and light concrete based on it // AIP Conference Proceedings. 2018. № 1(2015). 020109.
15. Каймонов В.В., Егорова А.Д., Попова М.Н., Докунаева А.А., Васильева Д.В. Повышение сульфатостойкости бетонов на основе портландцемента в условиях Якутии // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №. 8. С. 40–41.
16. Местников А.Е., Семенов С.С., Васильева Д.В. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. №. 12-1. С. 80–84.

Информация об авторах:

Васильева Дарья Вячеславовна, старший преподаватель кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». E-mail: omsvdy2910@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Попов Александр Леонидович, доцент кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». E-mail: surrukin@gmail.com. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Местников Алексей Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». E-mail: mestnikovae@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Поступила 23.03.2022 г.

© Васильева Д.В., Попов А.Л., Местников А.Е., 2022

Vasileva D.V., *Popov A.L., Mestnikov A.E.

North-Eastern Federal University

*E-mail: omsvdv2910@mail.ru

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF AN ALUMOSILICATE ADDITIVE BASED ON MOUNTAIN SAND ON THE PROPERTIES OF SULFATE-RESISTANT PORTLAND CEMENT

Abstract. The paper substantiates the effectiveness and prospects of research in the direction of developing an active mineral additive based on mountain sand of Yakutia for general construction cements in order to increase its sulfate resistance. This will expand the range of application of Portland cements operating in conditions of sulfate aggression. The Republic of Sakha (Yakutia) has many deposits of natural sands of aluminosilicate composition or the so-called "mountain sands". One of the large and developed quarries of mountain sands in Yakutia is the Kildyamskoye deposit. Today it is used for foundations and underlying road surfaces. The paper shows the possibility of obtaining an active mineral additive based on this sand. The influence of the dosage and dispersion level of the additive on the strength characteristics of cements and on the coefficient of sulfate resistance is studied in the range of $5\pm 2\%$ while maintaining brand strength. The introduction of an additive of more than 15% reduces the strength of cement by an average of 20%, the grade strength is no longer observed, while hydration processes slow down and over time in a sulfate environment, the strength of the samples first increases and then falls again. As a result of the work, an active mineral additive based on the sand of the Kildyamskoye deposit in cement is proposed. This gives a stable sulfate resistance coefficient equal to 0.95 while maintaining brand strength and hydration processes.

Keywords: Portland cement, aluminosilicate additive, mountain sand of the Kildyam deposit, sulfate resistance.

REFERENCES

1. Tolypina N.M., Shigoreva E.M., Golovin M.V., Shigorev D.S. Increase of concrete inoxidizability by application of active fillers of the second type [Povysheniye korrozionnoystoykosti betonov putem primeneniya aktivnykh zapolniteley vtorogo tipa]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. Vol. 4. No. 2. Pp. 27–32. doi: 10.12737/article_5c73fbf6df9f53.10093605.
2. Tolypina N.M., Shigoreva E.M., Golovin M.V., Shigorev D.S. Sulphate resistance of concrete made from reactive filler based on nepheline bearing rocks [Sul'fatostoykost' betona na osnove khimicheskiiaktivnogo zapolnitelya iz nefelinsoderzhashchikh porod]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. Vol. 2. No. 10. Pp. 21–26. doi: 10.12737/article_59cd0c585e1768.86979091.
3. Berdov G.I., Kamkha M.A., Parubov A.G., Sebelev I.M. Influence of ultrasonic activation of water on hydration and hardening of cement and tricalcium aluminate [Vliyaniye ul'trazvukovoy aktivatsii vody na gidratatsiyu i tverdeniye tsementa i trekhkal'tsiyevogo alyuminata]. Izvestia of higher educational institutions. Construction and architecture. 1991. No. 8. Pp. 53–56.
4. Frolov N. Experimental studies of the kinetics of the developmental corrosive damages of concrete in bent reinforced concrete elements under force and environmental effects [Eksperimental'nyye issledovaniya kinetiki razvitiya korrozionnykh povrezhdeniy betona v izgibayemykh zhelezobetonnykh elementakh pri silovykh i srednikh vozdeystviyakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 34–43. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43.
5. Borges Marinho A.L., Mol Santos C.M., Franco de Carvalho J.M., Mendes J.C. Ladle furnace slag as binder for cement-based composites. Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers. 2017. Vol. 29. No. 11. 04017207.
6. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Liseitsev Yu.L., Timokhin R.A., Bituyev A.V., Zaiakhanov M.Ye., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with improved shock resistance [Kompozitsionnyye vyazhushchiye dlya betonov povyshennoy udarnoy stoykosti]. Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University. 2019. Vol. 85. No. 1. Pp. 28–38. DOI: 10.18720/MCE.85.3
7. Han F., Zhang H., Pu Sh., Zhang Z. Hydration kinetics of composite binder containing slag at different temperatures. Journal of Thermal Analysis

and Calorimetry. 2015. Vol. 121. No. 2. Pp. 815–827.

8. Banevičienė V., Malaiškienė J., Zach J., Dvorak K. Composite binder containing industrial by-products (Fccw and psu) and nano SiO₂. Materials. 2021. Vol. 14. No. 7. 1604

9. Vasileva D., Protodiakonov E., Egorova A., Antsupova S. Modifying admixtures to cement compositions produced from local raw materials. MATEC Web of Conferences. 2018. No. 143. 02006.

10. Alfimova N.I., Gridchin A.M., Glagolev E.S., Lesovik R.V., Levchenko O.V., Pirieva S.I. Effective composite binders. Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 42–47.

11. Omran H., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Raahemifar K., Tookey J. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. No. 62. Pp. 1252–1269.

12. Wu Y., Wang J.-Y., Monteiro P.J.M., Zhang M.-H. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. Construction and Building Materials. 2015. No. 87. Pp. 100–112.

13. Fomina E.V., Lesovik V.S., Fomin A.E., Kozhukhova N.I., Lebedev M.S. Quality evaluation of carbonaceous industrial by-products and its effect on properties of autoclave aerated concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. No. 4. 042033.

14. Vasileva D.V., Fyodorov V.I., Mestnikov A.E. Physical and mechanical properties of granulated foam glass – Foam zeolite and light concrete based on it. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2015. No. 1. P. 020109.

15. Kaimonov V.V., Egorova A.D., Popova M.N., Dokunaeva A.A., Vasilyeva D.V. Improving the sulfate resistance of concretes based on Portland cement in the conditions of Yakutia [Povyshenie sul'fatostojkosti betonov na osnove portlandcementsa v usloviyah Yakutii]. Industrial and civil engineering, 2013. No. 8. Pp. 40–41.

16. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasilyeva D.V. Rational use of mineral resources of Yakutia in the technology of building materials [Racional'noe ispol'zovanie mineral'no-syr'evykh resursov Yakutii v tekhnologii stroitel'nykh materialov]. Fundamental research. 2017. No. 12-1. Pp. 80–84.

Information about the author

Vasileva, Daria V. Senior lecturer. E-mail: omsv2910@mail.ru. North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, st. Kulakovskogo, 50.

Popov, Aleksandr L. PhD. E-mail: surrukin@gmail.com. North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, st. Kulakovskogo, 50.

Mestnikov, Alexey E. DSc, Professor. E-mail: mestnikovae@mail.ru. North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, st. Kulakovskogo, 50.

Received 23.03.2022

Для цитирования:

Васильева Д.В., Попов А.Л., Местников А.Е. Влияние параметров алюмосиликатной добавки на основе горного песка на свойства сульфатостойкого портландцемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-17-25

For citation:

Vasileva D.V., Popov A.L., Mestnikov A.E. Influence of the parameters of an aluminosilicate additive based on mountain sand on the properties of sulfate-resistant portland cement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-17-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33

*Толыпина Н.М., Толыпин Д.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: tolypina.n@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗЖИЖЕНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАВ

Аннотация. Исследована эффективность действия анионоактивных суперпластификаторов в минеральных суспензиях на основе порошков с различными электроповерхностными свойствами. Показано, что разжижающий эффект от действия суперпластификаторов в суспензиях с положительно заряженными частицами карбоната кальция значительно превосходит аналогичный эффект в суспензиях на основе порошкообразного кварца с преобладающим отрицательным знаком заряда поверхности частиц. Установлено, что существенно повысить разжижающую способность анионных модификаторов (на 40–68 %) в кварцевых суспензиях можно за счет ввода карбоната кальция (5 %) при их совместном измельчении. Увеличение разжижения вызвано тем, что наблюдается блокировка отрицательно-заряженных активных центров кварцевого песка при совместном помоле с CaCO_3 . Показано, что на разжижение цементного теста с наполнителем состава 1:1 электроповерхностные свойства порошкообразного наполнителя оказывают второстепенное влияние, при этом важную роль играют гидроалюминатные частицы с положительным зарядом поверхности. Электроповерхностные свойства наполнителя значительно влияют на стабильность разжижающей способности СП во времени в связи с реакциями гетерокоагуляции с заряженными частицами гидратных фаз портландцемента. Показано, что прочность порошковых бетонов с 10 и 30 % наполнителей зависела от вида применяемого материала.

Ключевые слова: суперпластификатор, наполнитель, распыл конуса, кварцевый порошок, карбонат кальция, электроповерхностные свойства.

Введение. В настоящее время для регулирования водопотребности вяжущих систем используются органические поверхностно-активные вещества преимущественно анионного типа, которые содержат функциональные группы, такие как сульфогруппа ($-\text{SO}_3^-$), карбоксилат ($-\text{COO}^-$), гидроксильная группа ($-\text{OH}$) [1–4]. Исходя из основных положений химии поверхностно-активных веществ эти добавки адсорбируются большей частью на частицах с положительным зарядом [5–9], преимущественно на гидроалюминатах кальция, обладающих пластинчатой гексагональной формой и меньшей удельной поверхностью относительно гидросиликатов кальция [11–14]. Это приводит к электростатическому отталкиванию одноименно заряженных частиц гидратных фаз, сопровождающемуся разрушением флокулов и высвобождением иммобилизированной воды, которая становится свободной, в результате текучесть цементного теста возрастает [15].

В технологии бетонов в последнее время все чаще применяют минеральные тонкодисперсные наполнители, которые получают из природных и техногенных материалов: кварцевого песка, гранита, кварцитопесчаника, доменных шлаков и других, преимущественно с электроотрицательными поверхностными свойствами [16]. При этом для повышения разжижения бетонной смеси добавками суперпластификаторами предпочтительнее использование порошкообразных наполнителей с преобладающим количеством

положительно заряженных активных центров, что особенно значимо при низких расходах цемента (200–250 кг/м³). В этой связи минеральные наполнители нельзя рассматривать как инертные компоненты с точки зрения участия в процессе разжижения бетонной смеси с помощью ПАВ [17–19]. При этом следует учитывать, что применяемые минеральные тонкодисперсные добавки с различными электроповерхностными свойствами по-разному влияют на сцепление с цементной матрицей бетона. Если минеральные порошкообразные компоненты характеризуются положительными электроповерхностными свойствами (известняк, доломит, мрамор и тому подобное), то есть противоположного знака заряда, чем цементирующее вещество, это будет способствовать тесному контакту между ними, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики бетона. Несмотря на большую роль электроповерхностных явлений в вопросах гидратации, твердения, эксплуатации материалов и изделий из бетона, этим вопросам в последние десятилетия не уделялось должного внимания.

Исходя из вышеизложенного, следует цель работы: исследовать влияние минеральных наполнителей на эффективность действия разжижающих ПАВ.

Материалы и методы. В работе были использованы следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ($S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$), с техниче-

скими параметрами, соответствующими требованиям ГОСТ 10178-85; суперпластификаторы Полипласт СП-1 и Линамикс; наполнители с различными электроповерхностными свойствами: молотый кварцевый песок Нижнеольшанского месторождения с $S_{уд} = 510 \text{ м}^2/\text{кг}$ и содержанием

$\text{SiO}_2 - 98,2 \%$, и молотый мрамор Еленинского месторождения с $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Измерения электрокинетического потенциала поверхности частиц проводили на оборудовании Zetasizer Nano ZS при помощи методики МЗ-PALS на основе полного программного обеспечения (рис. 1).

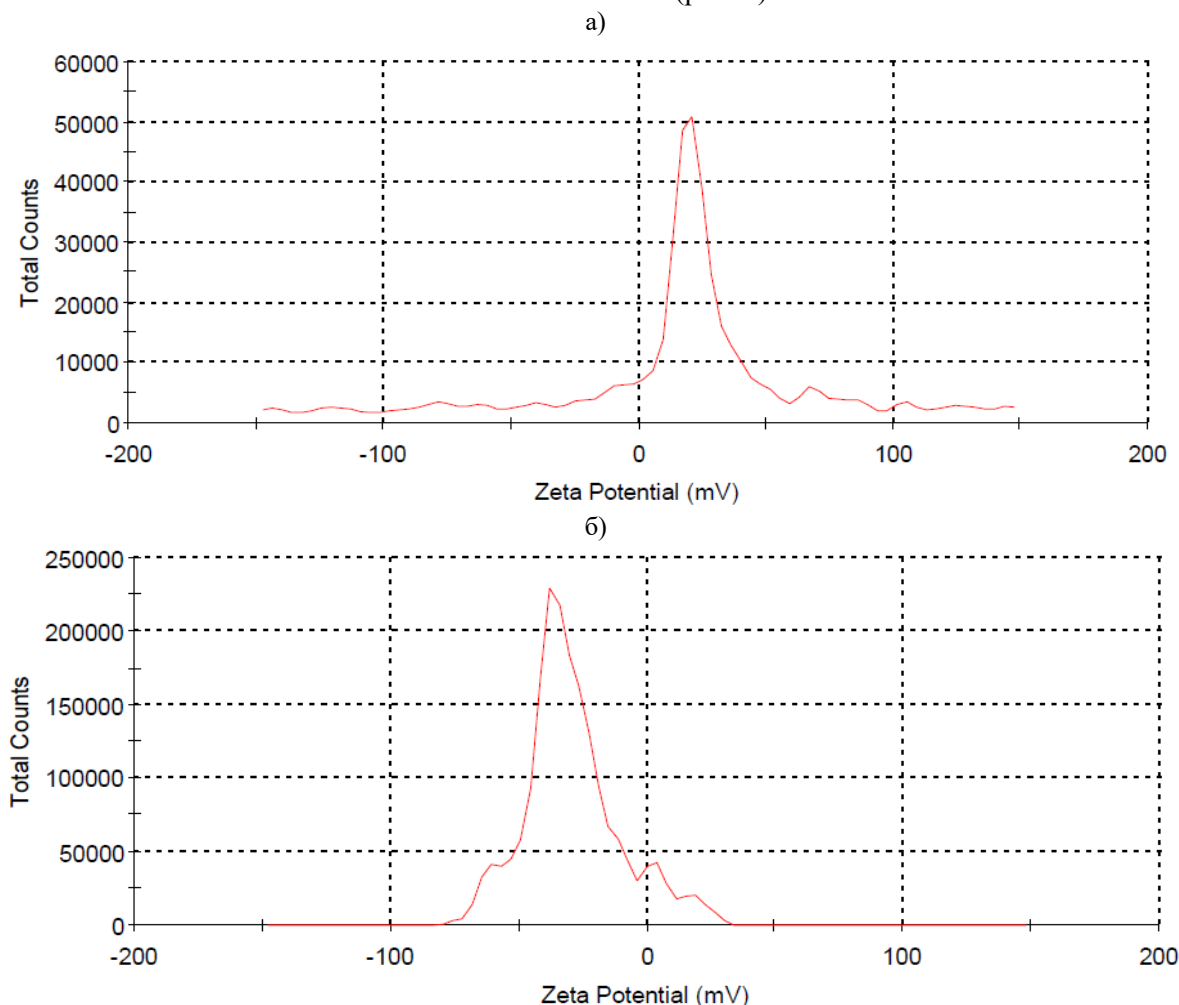


Рис. 1. Электрокинетический потенциал поверхности:
а) мрамор, б) кварцевый песок

Численные характеристики распределения активных центров на поверхности минеральных порошков, приведенные на рис. 1, показывают, что преобладающий заряд поверхности кварца $-31,6 \text{ mV}$, мрамора $+19,3 \text{ mV}$, также в небольших количествах присутствуют активные центры противоположного знака: у кварца $+3,13 \text{ mV}$ (7,9 %), у мрамора $-85,6 \text{ mV}$ (5,1 %).

Для оценки эффективности действия суперпластификаторов использовали метод мини-конуса, широко применяемый отечественными и зарубежными специалистами, хотя размеры используемых для исследований конусов различны. В данной работе использовали усеченный мини-конус высотой 40 мм, с диаметром нижнего отверстия 35 мм, верхнего — 20 мм.

Влияние порошковых наполнителей на прочность цементной матрицы проводили на смесях цемент:наполнитель = 70:30; 70:15:15; 90:10. На основе приведенных составов из теста нормальной густоты формовали образцы размером $2,5 \times 2,5 \times 10 \text{ см}$, которые после 28 и 180 сут твердения в нормальных условиях испытывали на прочность при изгибе и сжатии.

Основная часть. Эффективность действия добавок суперпластификаторов Полипласт СП-1 и Линамикс при дозировках 0,2–0,8 % в минеральных суспензиях без вяжущего определяли по распылу мини-конуса (рис. 2). Контрольное значение распыла мини-конуса мраморной суспензии ($B/C = 0,35$) и кварцевой суспензии ($B/C = 0,4$) без СП соответствовало 55 мм. Диаметр распыла суспензии мраморного порошка

повышался с вводом суперпластификаторов и ростом дозировки от 0,2 до 0,8 %: с Полипласт СП-1 до 230–250 мм, а с Линамикс до 210–270 мм. Значительно слабее происходит разжижение кварцевой суспензии под воздействием СП: диаметр расплыва мини-конуса с Полипласт СП-1 составил 163–172 мм, а с Линамикс – 147–205 мм.

Разница по расплыву суспензий разного состава может быть вызвана тем, что на поверхности частиц мрамора с преимущественно положительно заряженными активными центрами идет интенсивная адсорбция макромолекул добавок за счет электростатического взаимодействия с отрицательно заряженными функциональными группами добавок СП, благодаря чему анионактивные добавки обеспечивают лучший разжижающий эффект.

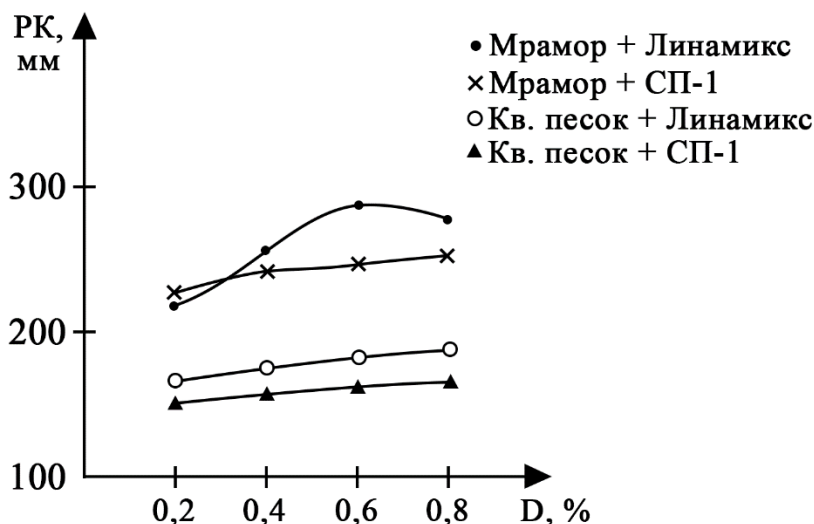


Рис. 2. Разжижение минеральных суспензий добавками ПАВ

Слабое разжижение кварцевых суспензий обусловлено тем, что преобладающий знак заряда поверхности частиц кварца и функциональной группы анионактивной добавки СП совпадают. Однако, несмотря на преобладающее количество отрицательно заряженных центров на поверхности кварцевых частиц, также образуется и некоторое количество положительно заряженных центров, число которых будет возрастать по мере измельчения кварцевого порошка, что обеспечивает незначительную адсорбцию макромолекул суперпластификаторов на частицах кварца и слабое разжижение.

Для исключения вероятности роста положительного потенциала поверхности частиц кварца за счет перехода положительно заряженных ионов железа на поверхность частиц кварца при помоле в вибрационной мельнице с металлическими шарами, был произведен помол в фарфоровой шаровой мельнице. Полученные данные показали, что разница в разжижении в зависимости от вида мельницы и мелющих тел малозначительна, при этом эффективность Линамикс несколько выше после помола кварца в фарфоровой мельнице (РК=165–195 мм), чем в металлической (РК=147–161 мм). Таким образом, предположение о влиянии примесей в виде ионов железа на

поверхности кварцевых частиц на эффективность СП не подтвердилось.

Для увеличения расплыва кварцевой суспензии добавляли 5 % мраморного порошка и затворяли смесь раствором суперпластификаторов. Результаты показали, что добавка 5 % мраморного порошка к кварцевому (95 %) повышает разжижение пасты по сравнению с кварцевой на 20–60 % с Полипласт СП-1 (0,2–0,8 %), и на 26–40 % с Линамикс (0,2–0,6 %). При совместном помоле кварцевого песка с добавкой 5 % карбоната кальция эффект разжижения существенно возрос и даже превзошел растекаемость мраморной суспензии. Диаметр расплыва конуса с Полипласт СП-1 составил 135–280 мм (при дозировках 0,2–0,8 %), с Линамикс 240–280 мм (при дозировках 0,2–0,8 %), что выше на 68–41 % расплыва кварцевой суспензии соответственно (рис. 3).

При совместном измельчении кварцевого песка с мрамором, последний измельчается более тонко, ввиду их различной размолоспособности. Твердость мрамора равна 3 (по шкале Мооса), а кварца – 7, поэтому размолоспособность мрамора гораздо выше. При совместном помоле образуются более мелкие частицы мрамора по сравнению с кварцевыми, они равномерно распределяются и налипают на поверхности частиц

кварца за счет электроповерхностных взаимодействий, тем самым смещают потенциал в положительную область. Увеличение расплыва кварцевой суспензии с добавкой карбоната кальция под

влиянием анионных модификаторов (суперпластификаторов) вызвано тем, что производится ликвидация отрицательно-заряженных активных центров кварцевого песка, полученных путем совместного помола с CaCO_3 .

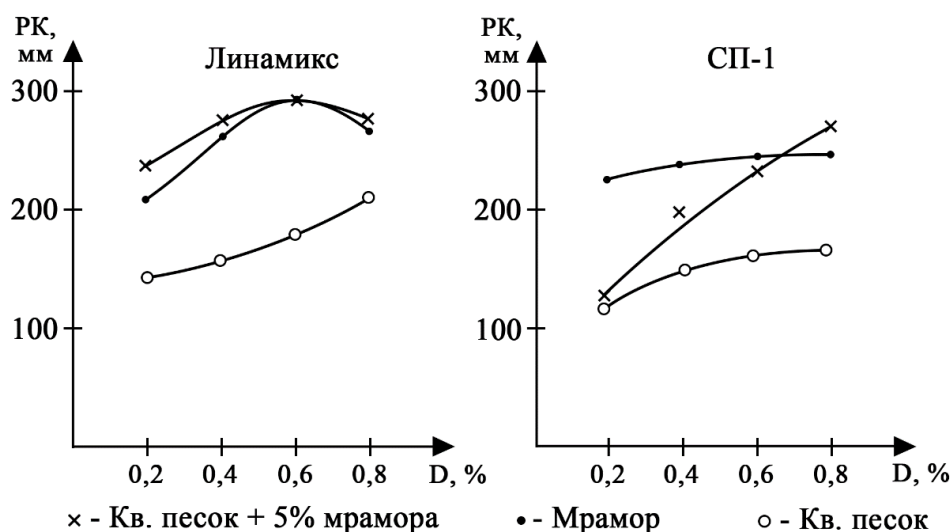


Рис. 3. Разжижение моно- и полиминеральных суспензий добавками ПАВ

Влияние порошкообразного наполнителя с положительно и отрицательно заряженными адсорбционными центрами на эффективность разжижения цементных систем исследовали на тесте состава вяжущее:наполнитель=1:1. В качестве критерия использовали минимальную дозировку добавки СП Линамикс, при которой тест достигает наибольшей первоначальной подвиж-

ности, а также стабильность подвижности в течение часа. Для этого измерения диаметра расплыва конуса проводили через 5 мин и через 1 час после затворения теста водой. Выбор СП Линамикс обусловлен тем, что он относится к группе добавок нового поколения на поликарбоксилатной основе, а СП-1 является аналогом С-3 (на нафталинформальдегидной основе). Полученные результаты приведены на рис. 4.

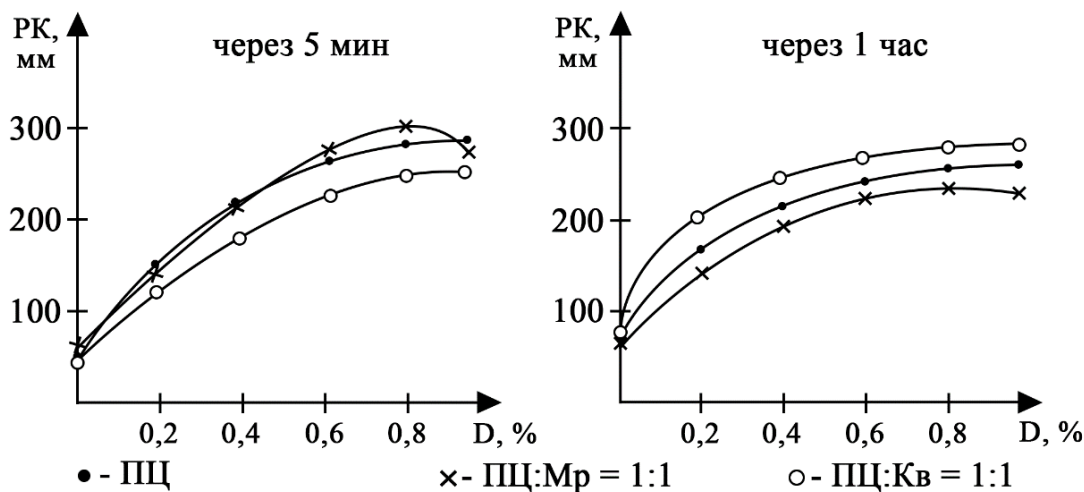


Рис. 4. Влияние минеральных наполнителей на совместимость цемента с СП Линамикс

Из полученных данных следует, что оптимальная дозировка Линамикс составила для ЦЕМ I – 1 %, при этом через час после затворения водой диаметр расплыва конуса уменьшился на 14 %. Для состава с мраморным порошком оптимальная дозировка 0,6 %, спустя час наблюдается максимальная потеря подвижности, расплыв конуса уменьшился на 28 %, что свидетельствует о

потери стабильности действия добавки. Тесто с кварцевым наполнителем максимально разжижается при дозировке 1 %, спустя час после затворения водой диаметр расплыва конуса увеличился на 12 %, вместо потери подвижности наблюдалось увеличение разжижения теста. Причиной данного явления может быть то, что

часть гидроалюминатных частиц портландцемента, имеющих положительный заряд поверхности, вступают в реакции гетерокоагуляции с отрицательно заряженными кварцевыми микро-частицами, поэтому адсорбция макромолекул суперпластификатора Линамикс на положительно заряженных частицах снижается, по причине того, что они заблокированы частицами кварца. Это аналогично вводу избыточного количества суперпластификатора в систему, свободной добавки Линамикс остается больше, чем в чистом портландцементном тесте. А в тесте на основе чистого портландцемента преобладают положительно заряженные $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гидроалюминаты кальция, поэтому большая часть макромолекул добавки СП адсорбируется на их поверхности, а в свободном виде добавки остается меньше. Дзета-потенциал у частиц кварца SiO_2 (≈ -30 mV) выше, чем у гидросиликатов кальция

(≈ -10 – -15 mV), поэтому на кварцевом наполнителе этот эффект выражен сильнее, чем на чистом портландцементе.

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что в цементном тесте вяжущее:наполнитель=1:1 применение кварцевого порошка, содержащего отрицательно заряженные адсорбционные центры, благоприятно влияет на продолжительность эффекта разжижения в отличие от порошка карбоната кальция с положительно заряженными адсорбционными центрами.

Влияние порошковых наполнителей на процессы структурообразования, с учетом электрокинетических явлений, обусловленных взаимодействием активных центров, находящихся на поверхности наполнителей и цементной матрицы, исследовали на образцах нормального твердения (табл. 1).

Таблица 1

Влияние порошковых наполнителей с различными электроповерхностными свойствами на прочность цементной матрицы

№	Состав			В/Ц	Предел прочности, МПа			
					28 сут		180 сут	
	ПЦ, %	Мр., %	Кв., %		Р изг	Р сж	Р изг	Р сж
1	100	–	–	0,26	1,35	62,56	1,86	68,94
2	70	30	–	0,3	1,15	48,58	1,45	50,9
3	70	–	30	0,3	1,01	39,32	1,22	42,05
4	70	15	15	0,3	1,18	40,31	1,40	44,79
5	90	10	–	0,3	1,14	44,92	1,54	59,07
6	90	–	10	0,3	1,05	43,27	1,39	56,8

Из приведенных данных видно, что мраморный и кварцевый наполнитель оказывают различное влияние на прочность бетона. При концентрации наполнителя 10 % прочность порошковых бетонов на мраморном наполнителе несущественно превышала прочность на кварцевом наполнителе (приблизительно на 4 %), как в нормативный срок (28 сут), так и в отдаленный период (180 сут). С ростом концентрации наполнителя до 30 % влияние вида наполнителя усиливается и более четко прослеживается превосходство по прочности образцов на мраморном наполнителе, чем на кварцевом, приблизительно на 23 %. Использование смеси наполнителей 1:1 (состав № 4) улучшает прочностные показатели порошкового бетона по сравнению с кварцевым порошком, но уступает мраморному наполнителю.

У частиц мрамора сцепление с цементной матрицей в основном происходит за счет электроповерхностных явлений, обусловленных донорно-акцепторным взаимодействием гидросиликатов кальция с положительно заряженными

активными центрами наполнителя, что способствует упрочнению зоны контакта.

В контактной зоне кварцевого наполнителя с преобладающим отрицательным поверхностным зарядом происходит осаждение положительно заряженных частиц портландита или гидроалюминатных фаз. Так как количество образующего портландита, из-за склонности к быстрой рекристаллизации, не в полной мере покрывает контактную зону, то большая часть поверхности кварцевого наполнителя контактирует с отрицательно заряженными гидросиликатами кальция, осаждающихся с высокой удельной поверхностью, что ослабляет зону контакта.

Выводы. Эффективность разжижения суспензий на основе минеральных порошков при помощи анионоактивных суперпластификаторов зависит от электроповерхностных свойств частиц. Наибольший разжижающий эффект наблюдается в суспензиях с положительно заряженными частицами. Если преобладающий знак заряда поверхности частиц порошка отрицательный, то есть совпадает со знаком заряда функциональной

группы суперпластификатора, то это приводит к снижению разжижения.

Разжижение суспензии на основе смеси, полученной при совместном помоле кварца с добавкой карбоната кальция (5 %) под влиянием анионных модификаторов, существенно возрастает на 40–68 % по сравнению с кварцевой. Увеличение распыла смешанной суспензии вызвано тем, что производится ликвидация отрицательно-заряженных активных центров кварцевого песка или других порошков кислого состава путем совместного помола с добавкой карбоната кальция, либо других солей, содержащих щелочеземельные или щелочные компоненты.

Электроповерхностные свойства минеральной добавки оказывают меньшее влияние на разжижение цементного теста с наполнителем состава 1:1, так как здесь сказывается преобладающее влияние гидроалюминатных частиц портландцемента, имеющих положительный заряд поверхности. Электроповерхностные свойства наполнителя существенно влияют на стабильность разжижающего эффекта во времени из-за возможных реакций гетерокоагуляции с заряженными частицами гидратных фаз.

Наполнитель из мрамора значительно повышает прочность цементной матрицы по сравнению с кварцевым песком, что обусловлено электроповерхностным взаимодействием частиц мрамора с формирующейся гидросиликатной связкой. Подбор наполнителей с учетом их электроповерхностных свойств позволит регулировать сцепление между частицами и цементной матрицей, что даст возможность существенно повысить прочность строительных материалов гидратационного твердения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва: Изд-во Технопроект, 1998. 768 с.
2. Вовк А.И. О некоторых особенностях применения гиперпластификаторов // Технологии бетонов. 2007. № 6. С. 12–13.
3. Pouchet S., Pochard I., Brunel F., Perrey D. Chemistry of the calcite/water interface: Influence of sulfate ions and consequences in terms of cohesion forces. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 52. Pp. 22–30. doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2013.04.002
4. Рамачандран В.С. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1988. 581 с.
5. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. О влиянии знака поверхностного заряда заполнителя на разжижающую способность суперпластификаторов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. №2. С. 22–26.

6. Рояк Г.С. Грановская И.В., Тарасова А.Ю. Пути развития пластификации бетонных смесей // Транспортное строительство. 2007. № 9. С. 29–30.

7. Bernt O., Petersen G. Design and mechanism of action of new superplasticizers for more durable concrete with improved performance characteristics // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. № 10. Pp. 1197–1209.

8. Вовк А.И. Адсорбция суперпластификаторов на продуктах гидратации минералов портландцементного клинкера. Закономерности процесса и строение адсорбционных слоев // Коллоидный журнал. 2000. Том 62. №2. С. 161–169.

9. Uchikawa H., Hanehara S., Sawaki D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. *Cement and Concrete Research*. 1997. Vol. 27. № 1. Pp. 37–50. doi:10.1016/S0008-8846(96)00207-4

10. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Гудкова Е.А. Влияние электроповерхностных свойств заполнителя на разжижающую способность суперпластификатора С-3 // Техника и технология силикатов. 2013. Том 20. № 1. С. 2–4.

11. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона: монография. М.: Изд-во Палеотип, 2006. 44 с.

12. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Влияние мелкого заполнителя из песка на эффективность действия добавок-разжижителей // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 74–79. doi: 10.26518/2071-7296-2016-3(49)-74-79

13. Калашников В.И., Гуляева Е.В., Валиев Д.М., Володин В.М., Хвастунов В.М. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 44–47.

14. Демьянова В.С., Калашников В.И., Вернигорова В.Н., Ильина И.Е. Высокодисперсные органоминеральные модификаторы цементного камня и бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 3. С. 49–53.

15. Вовк А.И. Суперпластификаторы в бетоне: анализ химии процессов. Часть 2 // Технологии бетонов. 2009. № 5. С. 10–13.

16. Зоткин А.Г. Эффекты от минеральных добавок в бетоне // Технологии бетонов. 2007. № 4. С. 10–12.

17. Леденев А.А. Особенности получения и применения органоминеральных добавок для бетонов с высокими физико-техническими свойствами // Научный вестник ВГАСА. Строительство и архитектура. 2009. № 4. С. 78–83.

18. Liu Jin-mei, Zhong-yuan Lu, Yun Yan. J. Wuhan. Reduction of the cement paste water demand

using a mixture of fly ash and superplasticizer // Univ. Technol. 2009. Vol. 31. № 4. Pp. 120–124.

19. Тараканов О.В., Логинов Р.С. Формирование микроструктуры цементных материалов с

минеральными и комплексными добавками // Технологии бетонов. 2009. № 7–8. С. 58–60.

Информация об авторах

Толыпина Наталья Максимовна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Толыпин Даниил Александрович, магистрант. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.05.2022 г.

© Толыпина Н.М., Толыпин Д.А., 2022

***Tolypina N.M., Tolypin D.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: tolypina.n@yandex.ru*

INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE LIQUISHING OF CEMENT SYSTEMS WITH THE HELP OF SURFACTANTS

Abstract. The effectiveness of the action of anion-active superplasticizers in mineral suspensions based on powders with different electrical surface properties has been studied. It is shown that in suspensions with positively charged particles (marble) the best thinning effect is observed. At the same time, in suspensions based on powdered quartz with a predominantly negative sign of the particle surface charge, the effectiveness of the action of superplasticizers is significantly reduced. It has been established that it is possible to increase significantly the diluting ability of anionic modifiers (by 40–68 %) in quartz suspensions by introducing calcium carbonate (5%) during their joint grinding. The increase in liquefaction is due to the fact that blocking of negatively charged active centers of quartz sand is observed during joint grinding with CaCO_3 . It is shown that the electrosurface properties of the powdered filler have a secondary effect on the liquefaction of the cement paste with a filler composition of 1:1, since hydroaluminate particles with a positive surface charge have a predominant effect on the liquefaction. The electrical surface properties of the filler significantly affect the stability of the diluting ability of the joint venture over time due to heterocoagulation reactions with charged particles of the hydrated phases of Portland cement. It is shown that the strength of powder concretes with 10 and 30 % fillers depended on the type of material used.

Keywords: superplasticizer, filler, cone flow, quartz powder, calcium carbonate, electrosurface properties.

REFERENCES

1. Batrakov V.G. Modified concrete. Theory and practice [Modificirovannye betony. Teoriya i praktika]. Moscow: Technoproekt Publishing House. 1998, 768 p. (rus)
2. Vovk A.I. On some features of the use of hyperplasticizers [O nekotoryh osobennostyah primeniya giperplastifikatorov]. Concrete Technology. 2007. No. 6. Pp.12–13. (rus)
3. Pouchet S., Pochard I., Brunel F., Perrey D. Chemistry of the calcite/water interface: Influence of sulfate ions and consequences in terms of cohesion forces. Cement and Concrete Research. 2013. Vol. 52. Pp. 22–30. doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2013.04.002
4. Ramachandran V.S. Additives in concrete [Dobavki v beton]. M.: Stroyizdat. 1988, 581 p. (rus)
5. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M. On the influence of the sign of the surface charge of the filler

on the liquefying ability of superplasticizers [O vliyaniy znaka poverhnostnogo zaryada zapolnitelya na razzhizhayushchuyu sposobnost' superplastifikatorov]. Izvestia of higher educational institutions. Construction. 2011. No. 2. Pp. 22–26. (rus)

6. Royak G.S. Granovskaya I.V., Tarasova A.Yu. Ways of development of plasticization of concrete mixtures [Puti razvitiya plastifikatsii betonnyh smesey]. Transport construction. 2007. No. 9. Pp. 29–30. (rus)

7. Bernt O., Petersen G. Design and mechanism of action of new superplasticizers for more durable concrete with improved performance characteristics. Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 10. Pp. 1197–1209.

8. Vovk A.I. Adsorption of superplasticizers on hydration products of Portland cement clinker minerals. Regularities of the process and the structure of adsorption layers [Adsorbcia superplastifikatorov

na produktah gidratacii mineralov portladcement-nogo klinkera. Zakonomernosti processa i stroenie adsorbtsionnykh sloev]. Colloidal journal. 2000. Vol. 62. No. 2. Pp. 161–169. (rus)

9. Uchikawa H., Hanehara S., Sawaki D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. Cement and Concrete Research. 1997. Vol. 27. No. 1. Pp. 37–50. doi:10.1016/S0008-8846(96)00207-4

10. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Gudkova E.A. Influence of the electrical surface properties of the filler on the liquefying ability of the superplasticizer C-3 [Vliyanie elektropoverhnostnykh svoystv zapolnitelya na razzhizhayushchuyu sposobnost' superplastifikatora S-3]. Technique and technology of silicates. 2013. Vol. 20. No. 1. Pp. 2–4. (rus)

11. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. Chemical additives for concrete modification: monograph [Himicheskie dobavki dlya modifikatsii betona: monografiya]. Moscow: Paleotype Publishing House. 2006, 44 p. (rus)

12. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Influence of fine aggregate from sand on the effectiveness of additives-thinners [Vliyanie melkogo zapolnitelya iz peska na effektivnost' deystviya dobavok-razzhizhitelej]. Bulletin of SibADI. 2016. No. 3 (49). Pp. 74–79. (rus)

13. Kalashnikov V.I., Gulyaeva E.V., Valiev D.M., Volodin V.M., Khvastunov V.M. High-performance powder-activated concretes for various functional purposes using superplasticizers [Vysokoeffektivnye poroshkovo-aktivirovannye betony razlichnogo funktsional'nogo naznacheniya s

ispol'zovaniem superplastifikatorov]. Stroitel'nye materialy. 2011. No. 11. Pp. 44–47. (rus)

14. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Vernigorova V.N., Ilyina I.E. Highly dispersed organomineral modifiers of cement stone and concrete [Vysokodispersnye organomineral'nye modifikatory cementnogo kamnya i betona]. News of higher educational institutions. Construction. 2003. No. 3. Pp. 49–53. (rus)

15. Vovk A.I. Superplasticizers in concrete: analysis of process chemistry. Part 2 [Superplastifikatory v betone: analiz himii processov. CHast' 2]. Concrete Technologies. 2009. No. 5. Pp. 10–13. (rus)

16. Zotkin A.G. Effects of mineral additives in concrete [Effekty ot mineral'nykh dobavok v betone]. Tekhnologiya betonov. 2007. No. 4. Pp. 10–12. (rus)

17. Ledenev A.A. Features of obtaining and using organomineral additives for concretes with high physical and technical properties [Osobennosti polucheniya i primeneniya organomineral'nykh dobavok dlya betonov s vysokimi fiziko-tekhnicheskimi svoystvami]. Bulletin of VGAS. Construction and architecture. 2009. No. 4. Pp. 78–83. (rus)

18. Liu Jin-mei, Zhong-yuan Lu, Yun Yan. J. Wuhan. Reduction of the cement paste water demand using a mixture of fly ash and superplasticizer. Univ. Technol. 2009. Vol. 31. No. 4. Pp. 120–124.

19. Tarakanov O.V., Loginov R.S. Formation of the microstructure of cement materials with mineral and complex additives [Formirovanie mikrostruktury cementnykh materialov s mineral'nymi i kompleksnymi dobavkami]. Tekhnologiya betonov. 2009. No. 7–8. Pp. 58–60. (rus)

Information about the authors

Tolypina, Natalya M. DSc, Professor. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tolypin, Daniil A. Master student. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.05.2022

Для цитирования:

Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Влияние минеральных наполнителей на разжижение цементных систем с помощью ПАВ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33

For citation:

Tolypina N.M., Tolypin D.A. Influence of mineral fillers on the liquishing of cement systems with the help of surfactants. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49

*Василькин А.А., Зубков Г.В

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НАВЕСА ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Аннотация. В статье поставлена и решена задача поиска минимальной массы конструкции навеса при заданных конструктивной схеме и условиях нагружения. При этом, рассматривалось два варианта конструктивной схемы – с длиной навеса 3 и 6 м. В качестве критерия оптимальности принята металлоемкость конструкции. В качестве варьируемых параметров были выбраны форма поперечного сечения балки, прочностные характеристики материала конструкции и геометрические параметры конструкции. Задача решалась численным методом, для этого, методами строительной механики определены усилия в элементах конструкции, перемещения и прогибы балки и подвеса, затем полученные формальные условия прочности и жесткости были включены в алгоритм, на основе которого разработана программа в одном из языке программирования. Фактически, в статье решалась оптимизационная задача по критерию оптимальности в виде стоимости конструкции, с ограничениями в виде габаритных размеров и условий прочности и жесткости. Такой метод позволит быстро определять НДС конструкции, при заданной расчетной схеме, для любых габаритов, нагрузки и типа применяемых элементов. Данный подход можно рассматривать как одно из приложений ВМ методологии, то есть автоматизировать процесс проектирования конкретной конструкции и может применяться в практической работе, позволяет существенно экономить время проектирования на поиск оптимального решения.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, критерий оптимальности, несущая способность, металлоемкость.

Введение. На сегодняшний день теория оптимального проектирования строительных конструкций является одним из интенсивно развивающихся разделов строительной механики [1–4]. Практическое применение решений, разработанных в рамках этой теории позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию объекта и вместе с тем, повысить производительность труда инженера-проектировщика [5]. Такой результат может быть достигнут двумя путями: разработкой или использование алгоритма, выполняющего оптимизацию любой предложенной строительной конструкции, или выявлением оптимальных параметров определенной конструкции, которые могут включать в себя ее геометрические характеристики, характеристики применяемых материалов, сечение элементов и т.п. В данной статье было решено применить второй способ: выявить оптимальное проектное решение для конструкции навеса.

Постановка задачи. В настоящем исследовании определяется оптимальный вариант проектного решения плоской стержневой конструкции методом параметрической оптимизации. Данный метод широко применяется в строительстве [6–8], наряду с эволюционными алгоритмами [1, 9–11]

Критерий оптимальности решения зависит от поставленной задачи и должен быть формализован.

В подавляющем большинстве исследований в роли критерия оптимальности принята металлоемкость конструкции [3, 5, 8, 12]. В данном исследовании было принято решение также использовать металлоемкость в качестве критерия оптимальности.

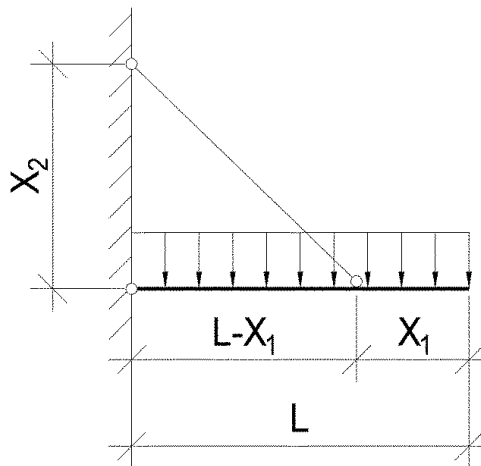


Рис. 1. Расчетная схема исследуемой конструкции

Исследуемая конструкция представляет собой консольную балку с подвесом, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. На практике такую расчетную схему могут иметь навесы и конструкции покрытия [13]. Тип сечения балки является варьируемым параметром, сечение подвеса – прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006. Расчетная схема

конструкции представлена на рис.1. Рассмотрены следующие варианты конструкции: с вылетом $L=6$ м и максимальной высотой крепления подвеса равной 6 м и с вылетом $L=3$ м и максимальной высотой крепления подвеса $X_{2\max}=3$ м. Во всех вариантах расчетная нагрузка была равна

2,1 кН/м, нормативная 1,5 кН/м. Решение задачи осуществляется численным методом, с помощью алгоритма, описанного ниже.

Варьируемые параметры и их значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения варьируемых параметров

Варьируемые параметры	Значения
Вылет конструкции и максимальная высота крепления подвеса	3, 6 м
Расстояние от края балки до точки крепления подвеса (X_1)	От 0 до $7/8L$ с шагом $L/8$
Высота крепления подвеса (X_2)	От $X_{2\max}$ до $X_{2\max}/8$ с шагом $X_{2\max}/8$
Класс стали	C245, C285, C345
Тип сечения балки	Труба стальная электросварная прямошовная по ГОСТ 10704-91
	Труба стальная профильная по ГОСТ 32913-2015 – квадратная (по прил. А)
	Труба стальная профильная по ГОСТ 32913-2015 – прямоугольная (по прил. Б)
	Швеллер стальной горячекатаный с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-97
	Двутавр стальной горячекатаный с параллельными гранями полок по ГОСТ Р 57837-2017

Алгоритм расчета. Методика расчета реализована в программной среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. Расчет производился в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции".

Автоматизация оптимального проектирования чаще всего возможна на основе использования мощных коммерческих комплексов [14]. Также в исследовательской практике стали появляться работы по оптимизации тех или иных конструкций, для расчета которых создается отдельная небольшая программа на одном из языков программирования, учитывающая специфику конкретной конструкции [5]. Данное направление можно рассматривать как одно из проявлений BIM технологий.

На первом этапе расчета задаются значения варьируемых параметров: геометрические характеристики конструкции, закон их изменения, свойства материала конструкции, тип используемого сечения.

На втором этапе происходит расчет напряженно-деформированного состояния конструкции. Программой вычисляются моменты и продольные силы в двух критических точках – в середине пролета между опорой балки и точкой крепления подвеса и на свободном конце консоли.

Далее происходит итерационный подбор сечения элементов. Для подбора используются заранее введенные в алгоритм сортаменты. Особенность алгоритма заключается в том, что для первого расчета принимается профиль с наименьшей массой 1 метра. Затем производится анализ несущей способности сечения по I и II группе предельных состояний. Напряженно-деформированное состояние части балки между опорой и точкой подвеса рассматривается в виде изгиба со сжатием, консольной части балки – в виде изгиба. Прогибы в двух точках балки определяются по следующим формулам [15]:

Формула для прогиба в середине пролета:

$$\omega_1 = -\frac{ql^4}{384EI} \left(5 - 12 \frac{X_1^2}{l^2} \right), \quad (1)$$

где $l = L - X_1$;

Формула для прогиба на конце консоли:

$$\omega_2 = -\frac{qX_1^4}{24EI} \left(3 + 4 \frac{l}{X_1} - \frac{l^3}{X_1^3} \right), \quad (2)$$

где $l = L - X_1$;

При недостаточной несущей способности профиля принимается следующий по массе профиль, и так далее. Подобный алгоритм позволяет обеспечить подбор профиля минимальной массы.

На следующем шаге вычисляется продольная сила в подвесе и происходит подбор его сечения по принципу, подобному принципу подбора сечения балки.

После этого по заданному закону, в соответствии с диапазоном вариации, приведенному в таблице 1 автоматически меняется геометрия конструкции и алгоритм подбора сечений повторяется. После расчета всех предусмотренных вариантов подобранные профили, вычисленная масса конструкции и другие необходимые для анализа данные записываются в текстовый файл и алгоритм завершает работу.

В итоге, предоставленный алгоритм выполняет подбор сечений для 64 вариантов конструкции (8 вариантов расстояния от края балки до точки крепления подвеса и 8 вариантов высоты

крепления подвеса). Подобный расчет выполняется для всех вариантов класса стали, типа поперечного сечения балки и вылета конструкции. Всего в процессе решения оптимизационной задачи рассматривается 1536 вариантов проектного решения конструкции (64 варианта геометрической конфигурации, 3 класса стали, 4 типа поперечного сечения балки, 2 варианта вылета конструкции)

Анализ результатов. Результаты расчета представлены в таблице 2. Для навеса вылетом 3 метра наиболее оптимальным сечением балки являются: прямоугольная труба при классах стали С245 и С285 и круглая труба при классе стали С345. Для навеса вылетом 6 метров при всех классах стали наиболее оптимальным сечением является круглая труба.

Таблица 2

Масса наиболее оптимального проектного варианта для каждого типа сечения

	L = 3 м			L = 6 м		
	C245	C285	C345	C245	C285	C345
Круглая труба	7,75	6,96	<u>6,21</u>	<u>35,64</u>	<u>32,13</u>	<u>31,64</u>
Квадратная труба	8,60	8,48	8,40	50,57	50,32	49,83
Прямоугольная труба	<u>7,40</u>	<u>6,59</u>	6,51	42,11	41,86	41,37
Швеллер	15,13	–	–	54,05	–	–
Двутавр	24,91	–	–	51,11	–	–

Швеллер и двутавр являются наименее оптимальными типами сечений. Это можно объяснить тем, что сечения в сортаменте этих профилей располагаются с большим «шагом» по несущей способности, что вызывает неполное использование несущей способности профиля (в особенности на вылете 3 м) и не позволяет подобрать оптимальное сечение.

Так, при использовании двутавра, в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции процент использования несущей способности равен 14 % по 1-ой группе ПС, 5 % по 2-ой группе ПС при вылете 3 м и 53 % по 1-ой группе ПС, 57 % по 2-ой группе ПС при вылете 6 м (при классе стали С245). При этом в обоих случаях принимается профиль 10Б1 – наименее прочный в сортаменте.

При использовании швеллера возникает подобная ситуация. При вылете 3 м (класс стали С245) в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции принимается профиль 5П, наименее прочный в сортаменте, и процент использования его несущей способности равняется 50 % по 1-ой группе ПС и 40 % по 2-ой группе ПС. При вылете 6 м (класс стали С245) принимается профиль 10П, процент использования его несущей способности составляет 52 % по 1-ой группе ПС и 55 % по 2-ой группе ПС.

Квадратные, прямоугольные и круглые трубы обладают более «частым» сортаментом,

чем двутавр и швеллер. Это позволяет подбирать более оптимальные сечения с высоким процентом использования несущей способности.

Квадратная профильная труба среди трех вышеперечисленных профилей является наименее оптимальным сечением для использования в исследуемой конструкции. Это связано с менее выгодным распределением массы по сравнению с прямоугольной профильной трубой, а также отсутствием в сортаменте тонкостенных сечений, как у круглых труб. Так, например, при вылете 3 м и классе стали С245 в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции принимаются следующие сечения: квадратная профильная труба 45×45×2, прямоугольная профильная труба 60×40×1,5 и круглая труба $\varnothing 70 \times 1,4$. Сравнивая их характеристики видно, при большей массе квадратная труба имеет меньшие характеристики несущей способности. Вследствие этого масса конструкции при ее применении больше, чем при использовании других профилей. На рисунках 6–11 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании квадратной профильной трубы. Как видно из графиков, при повышении класса стали масса оптимального варианта конструкции изменяется незначительно. Это связано с тем, что в этом случае сечения подбираются по 2-ой группе ПС. Так, при вылете 3 м при классах стали С245, С285, С345 принимается

сечение $45 \times 45 \times 2$ мм, процент использования несущей способности по 1-ой группе ПС составляет соответственно 99 %, 84 %, и 71 %, по 2-ой группе ПС 89 % по всех случаях. При вылете 6 м при классах стали С245, С285, С345 принимается сечение $90 \times 90 \times 3$ мм, процент использования несущей способности по 1-ой группе ПС составляет соответственно 64 %, 55 %, и 46 %, по 2-ой группе ПС 77 % по всех случаях. Незначительное

снижение массы конструкции при повышении класса стали связано с изменением сечения подвеса, которое, однако, слабо влияет на общую массу конструкции. Можно сделать вывод, что увеличение класса стали при использовании квадратной профильной трубы нецелесообразно, поскольку повышает стоимость конструкции, практически не снижая ее металлоемкости.

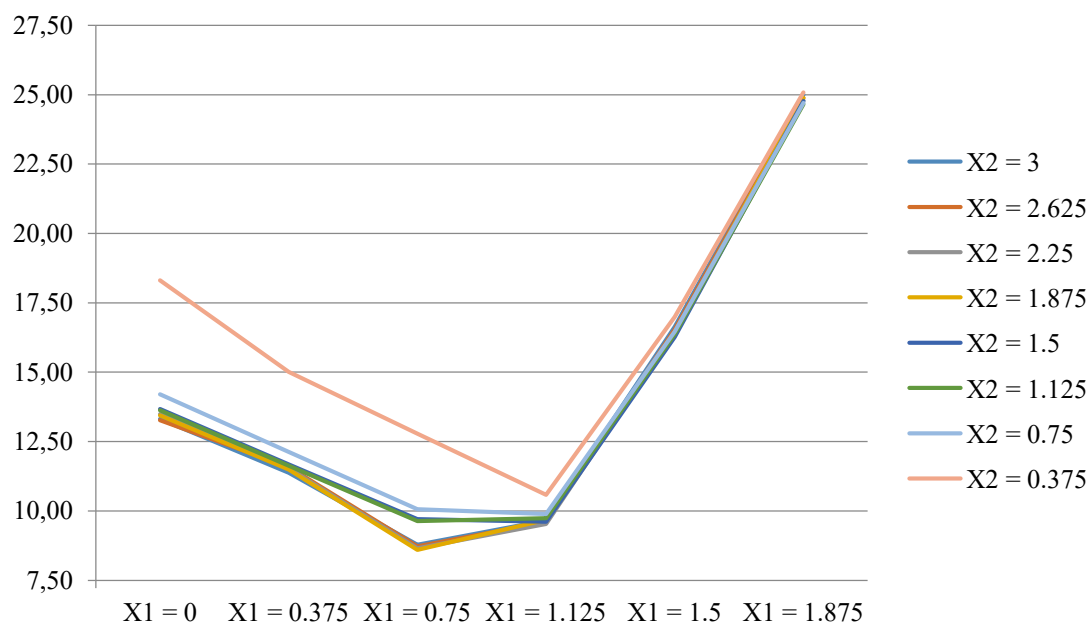


Рис. 6. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С245, вылет 3 м), кг

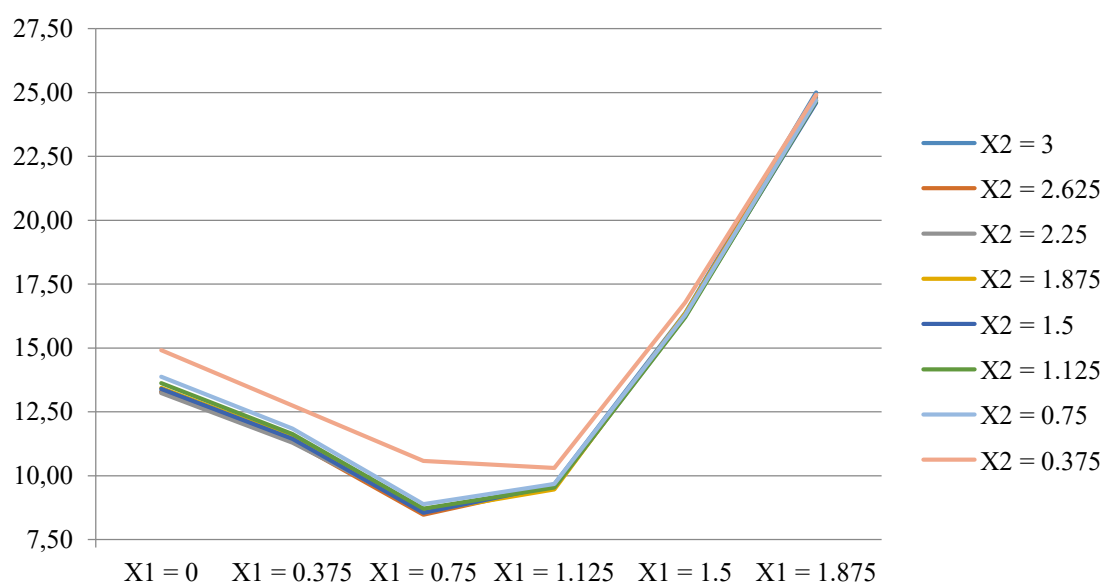


Рис. 7. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

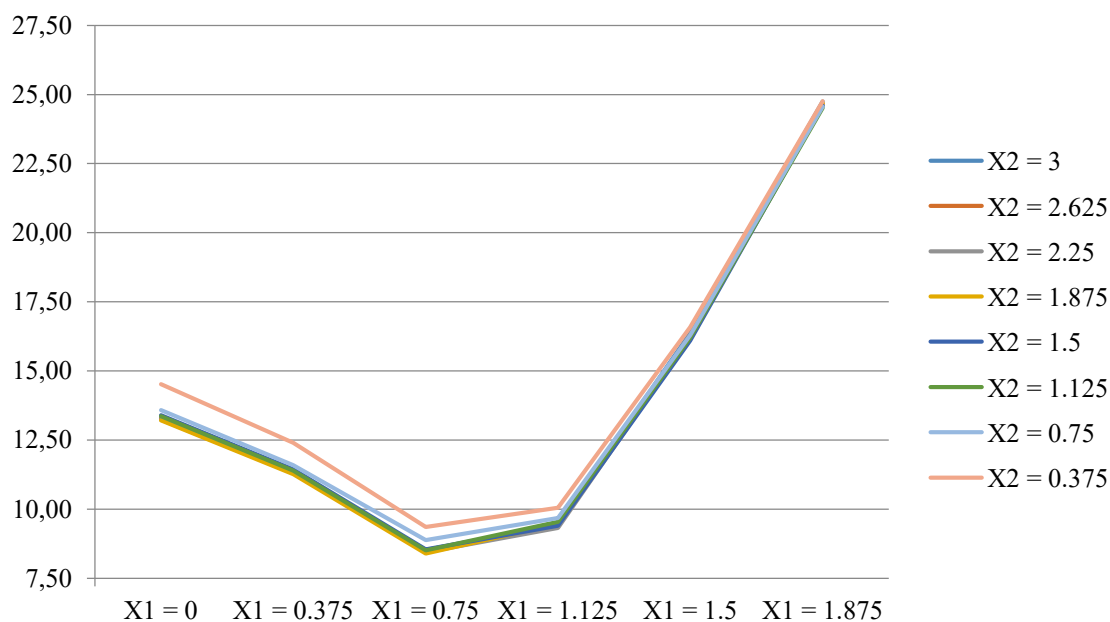


Рис. 8. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С345, вылет 3 м), кг

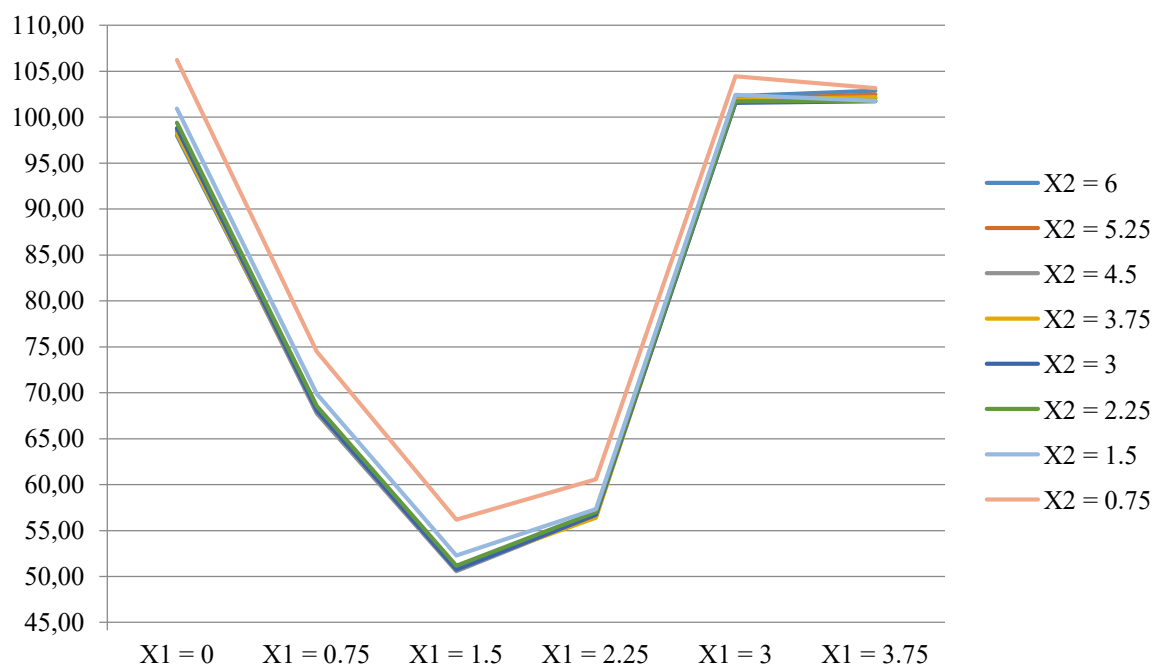


Рис. 9. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

Прямоугольная профильная труба является одним из наиболее оптимальных сечений для исследуемой конструкции. При одинаковой массе и

габаритах ее прочностные и жесткостные характеристики превосходят таковые у круглых труб. Сравнение двух схожих профилей прямоугольного и круглого сечения приведено в таблице 3.

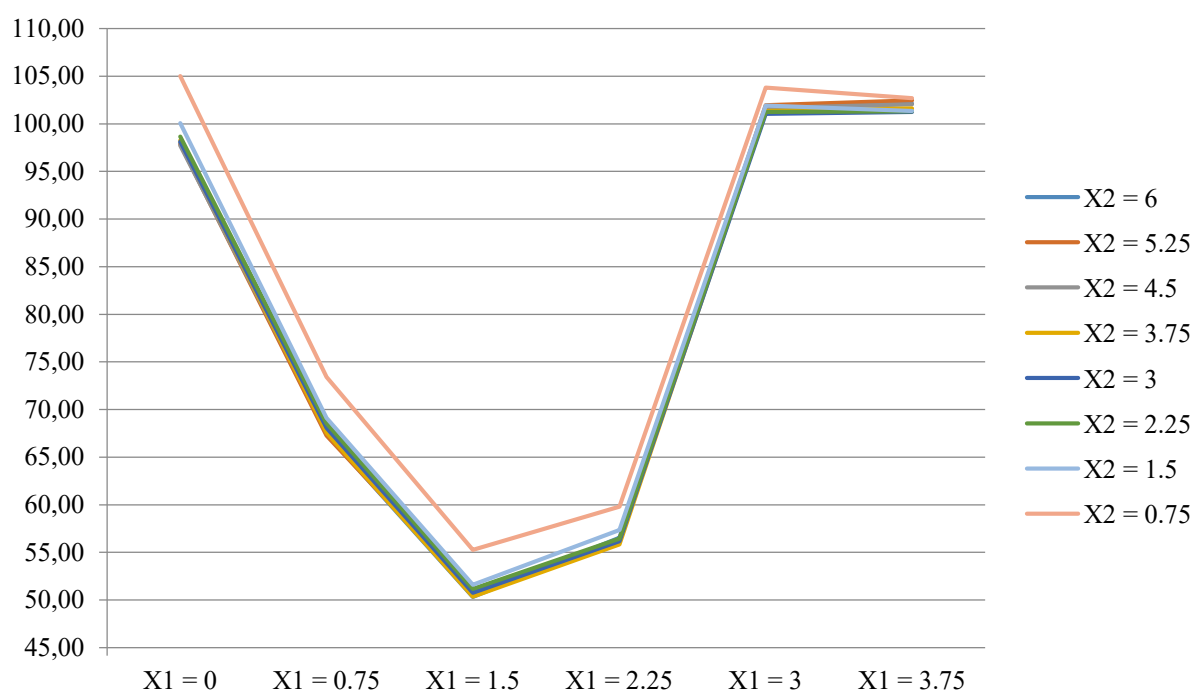


Рис. 10. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

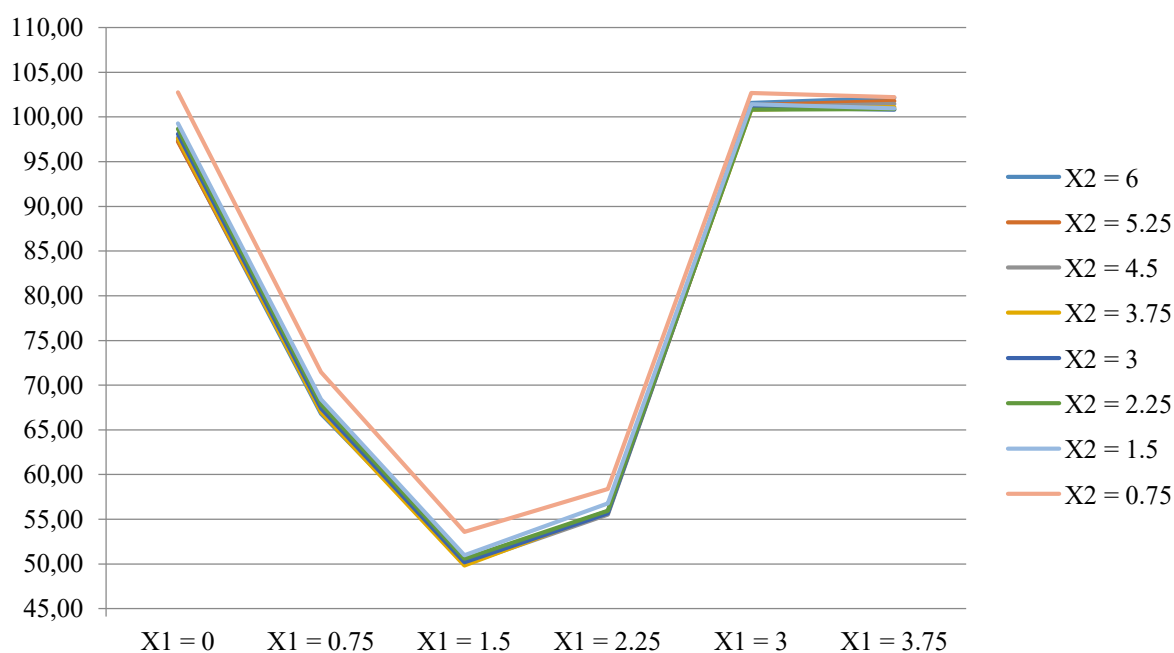


Рис. 11. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

Таблица 3

Сравнение характеристик профилей

Профиль	Момент сопротивления W , см^3	Момент инерции I , см^4	Масса 1 п.м. профиля, кг/м
60×30×1,5	4,00	11,99	2,02
∅60×1,4	3,69	11,06	2,02

Таким образом, теоретически, прямоугольная труба является наиболее оптимальным профилем с точки зрения соотношения массы и прочностных характеристик, при этом обладая достаточно обширным сортаментом, что позволяет подбирать оптимальное сечение с большим процентом использования несущей способности.

Расчеты отчасти подтверждают это предположение. Так, при вылете 3 м прямоугольная

профильная труба является оптимальным сечением в двух случаях из трех.

На рис. 12–17 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании прямоугольной профильной трубы. Принятые при различных вылетах и классах стали профили и проценты использования их несущей способности приведены в таблице 4.

Таблица 4

Процент использования несущей способности принятых сечений

Вылет, м	Класс стали	Профиль	1-ая ГПС, %	2-ая ГПС, %
3	C245	60×40×1,5	96	63
	C285	60×30×1,5	96	77
	C345	60×30×1,5	81	77
6	C245	100×50×3	85	92
	C285	100×50×3	72	92
	C345	100×50×3	61	92

Как видно из таблицы и графиков, повышение класса стали с C245 до C285 при вылете 3 м приводит к уменьшению металлоемкости конструкции. Дальнейшее же увеличение класса стали ее не уменьшает. Такая же ситуация наблюдается при вылете 6 м. Это связано с тем,

что несущая способность сечения ограничена его жесткостными характеристиками, которые не повышаются при увеличении класса стали. Таким образом, увеличение класса стали свыше C345 для сечения в виде прямоугольной профильной трубы в целом нецелесообразно.

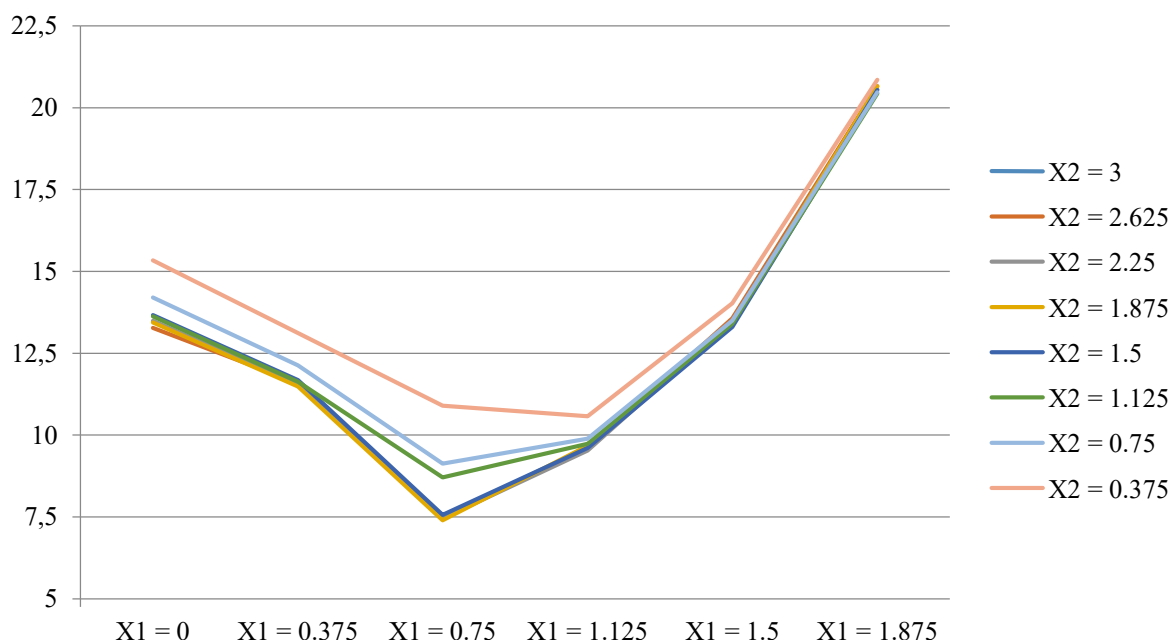


Рис. 12. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь C245, вылет 3 м), кг

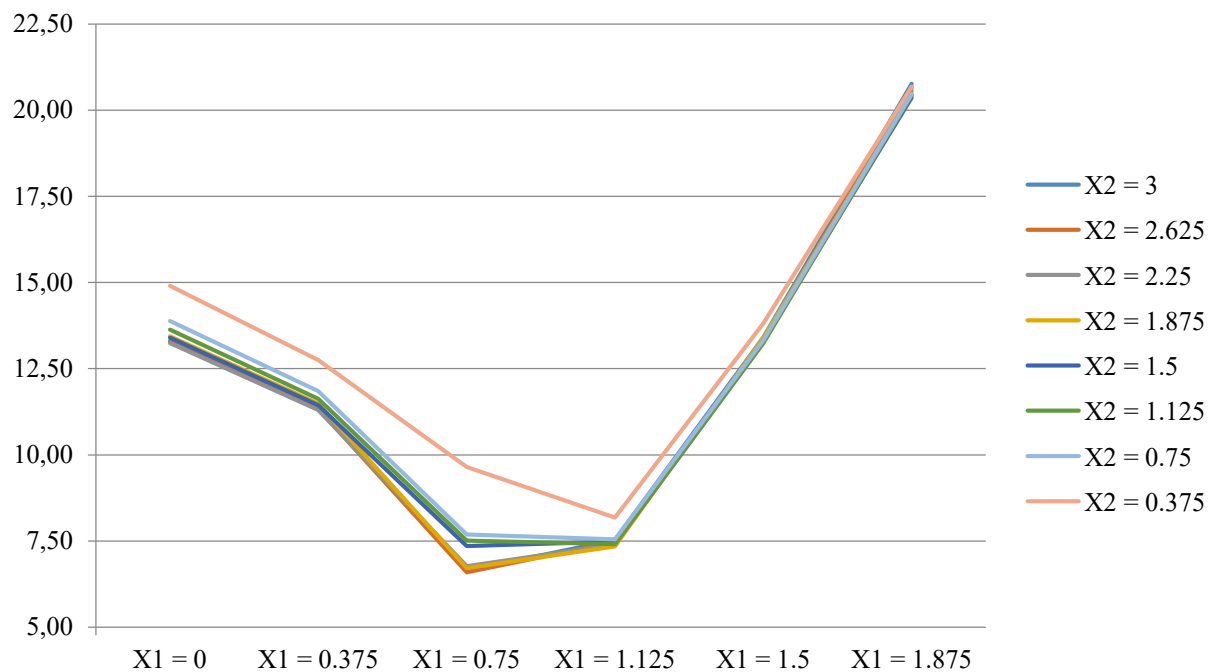


Рис. 13. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

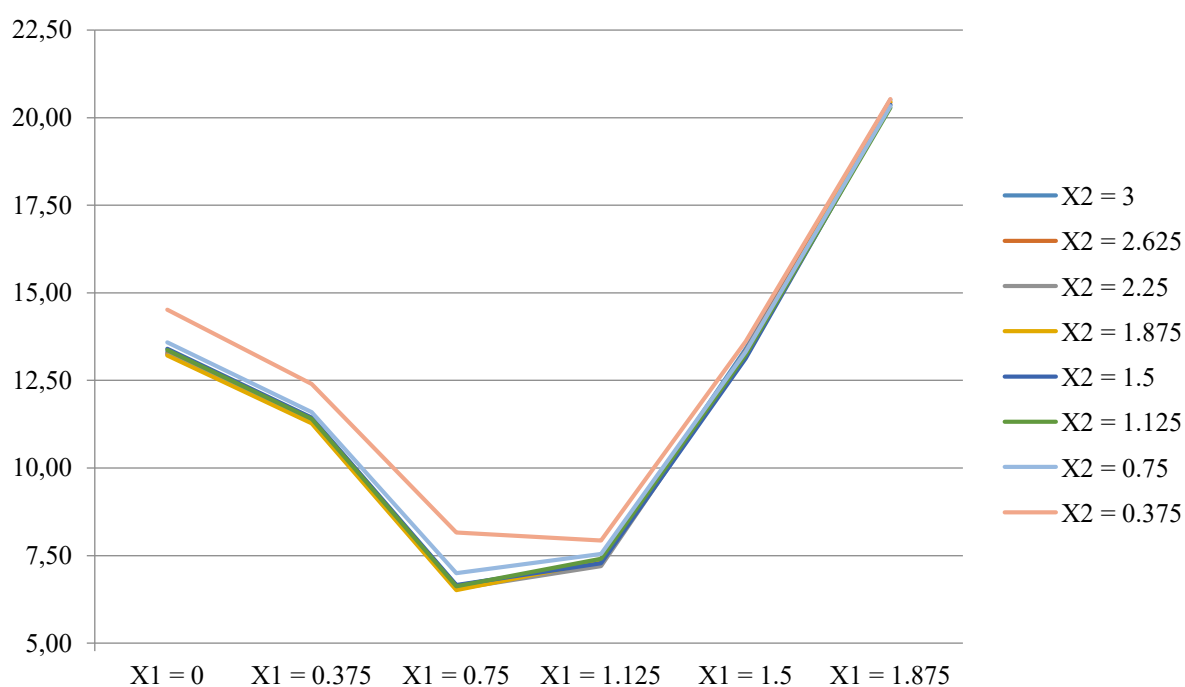


Рис. 14. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С345, вылет 3 м), кг

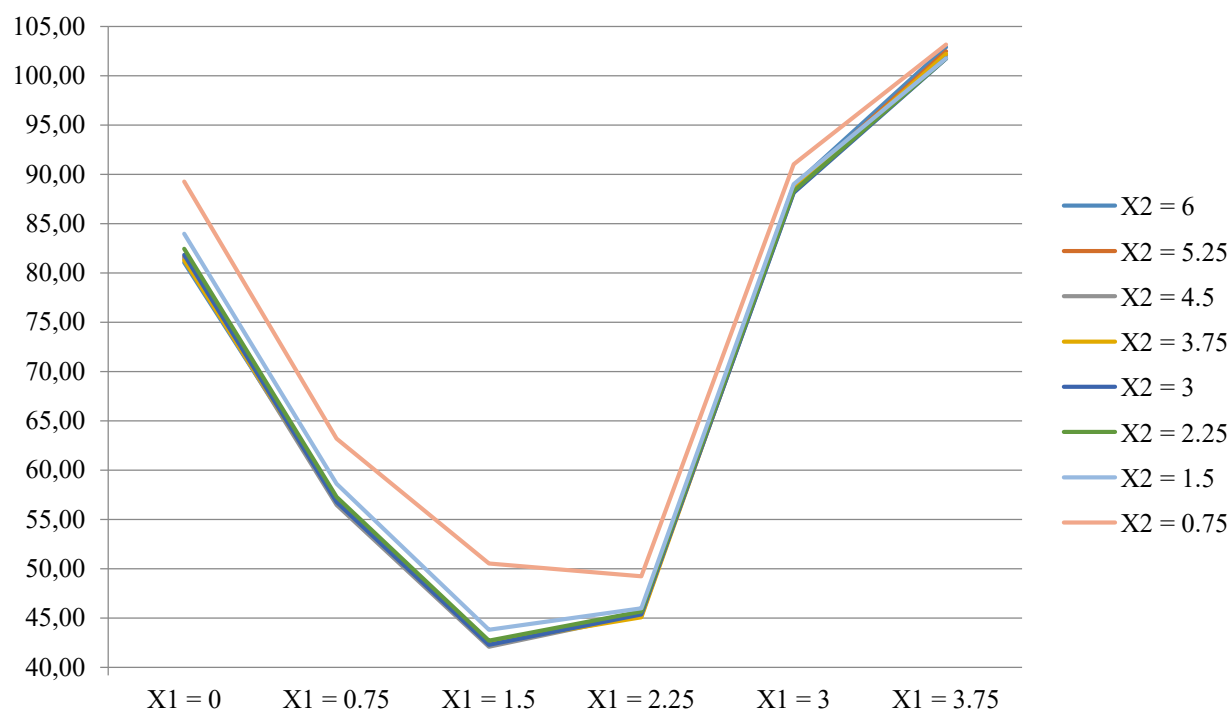


Рис. 15. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

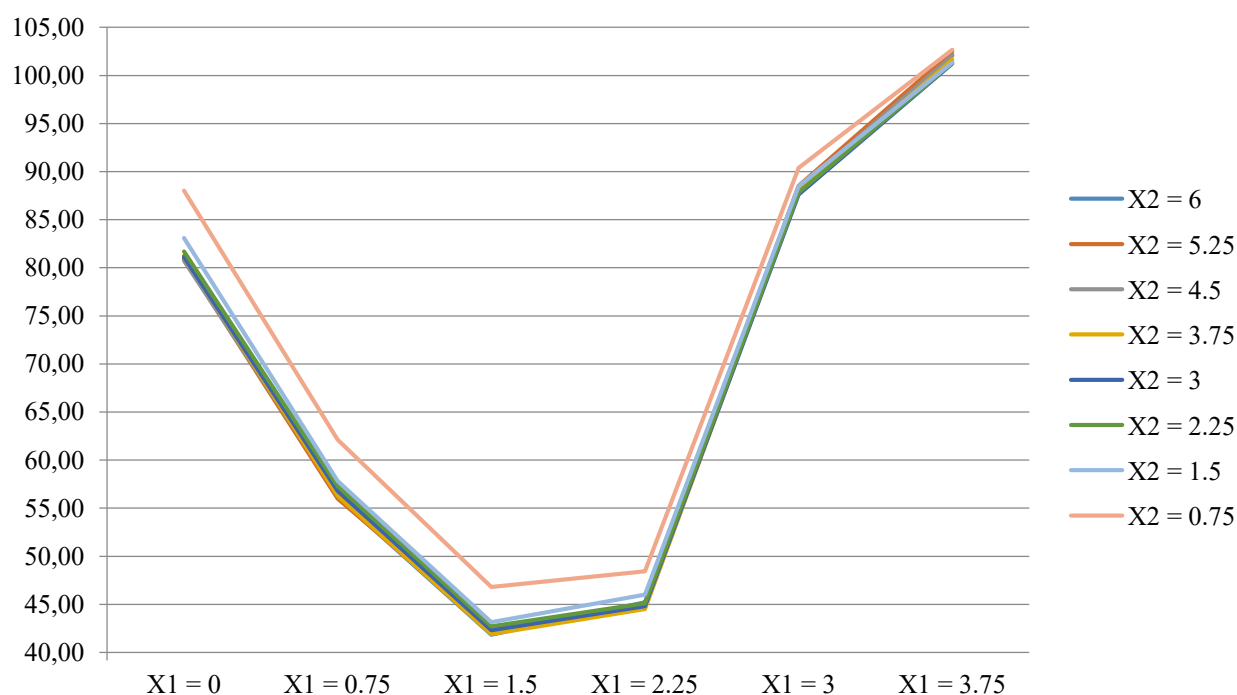


Рис. 16. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

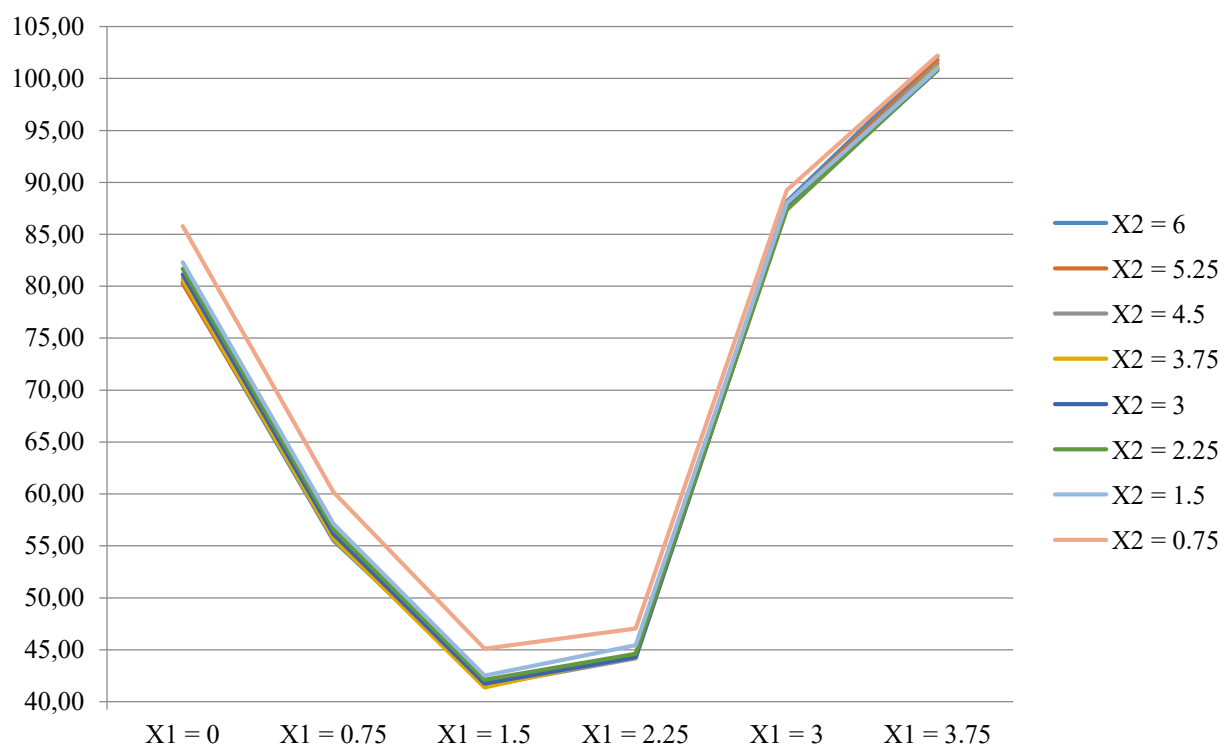


Рис. 17. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

Круглая труба, наряду с прямоугольной, является одним из наиболее оптимальных сечений. Несмотря на то, что, теоретически, при одинаковой массе и габаритах ее прочностные характеристики уступают таковым у прямоугольной трубы, при некоторых параметрах конструкции именно круглая труба оказывается наиболее оптимальным сечением. Вероятно, это вызвано частым шагом диаметров сечения и толщины стенки в принятом сортаменте. Так, в интервале диаметров сечения от 50 до 80 мм, который является актуальным при подборе сечения для конструкции вылетом 3 м, шаг диаметров составляет ~3 мм, а шаг толщины стенки 0,1...0,2 мм. В интервале диаметров от 110 до 130 мм шаг диаметров несколько больше – 6...13 мм, но шаг толщины стенки остается таким же малым – 0,2 мм. Это позволяет подобрать сечение с максимальным процентом использования несущей способности, и, следовательно, с минимальной металлоемкостью. Кроме этого, понижению металлоем-

кости способствует наличие в сортаменте тонкостенных сечений достаточно больших габаритов, которые обладают более высоким отношением несущей способности к массе, чем сечения с более толстыми стенками.

На рисунках 18-23 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании круглой трубы. Изменение класса стали для круглой трубы, вероятно, является наиболее целесообразным. Так, при вылете 3 м увеличение класса стали позволяет значительно снизить металлоемкость и добиться практически полного использования несущей способности сечения. При вылете 6 м увеличение класса стали с С245 до С285 также снижает массу конструкции, но дальнейшее увеличение уже на нее не влияет, так как прогиб конструкции близок к предельному. Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании круглой трубы повышение класса стали является целесообразным, так как позволяет снизить металлоемкость в большинстве расчетных случаев.

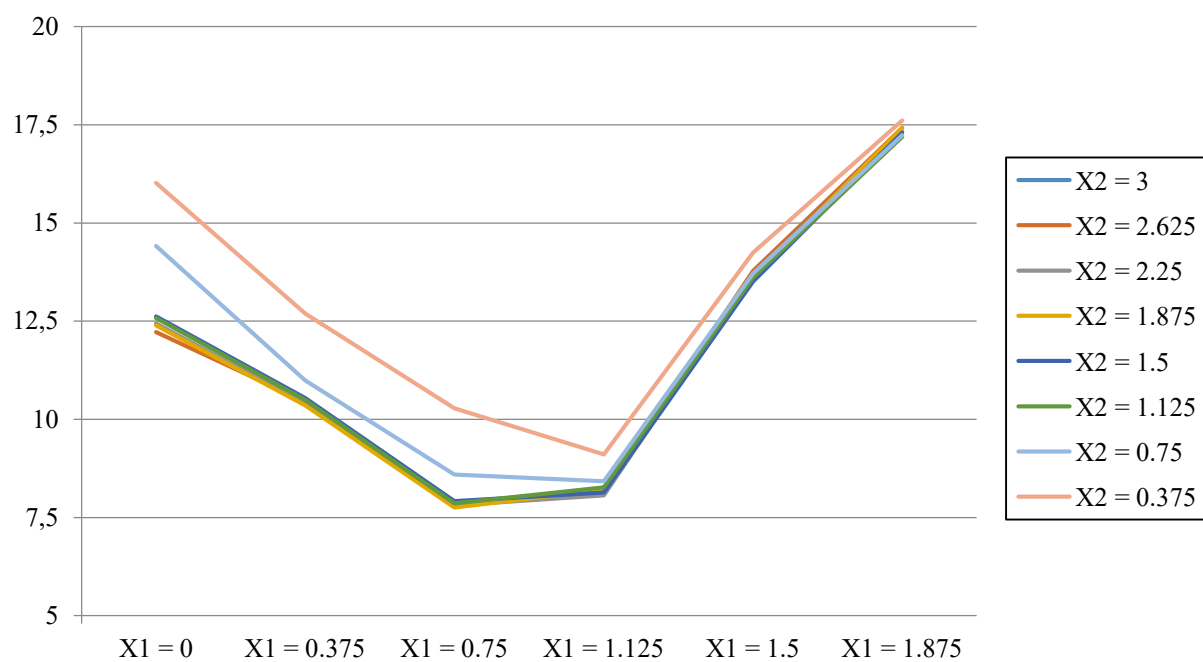


Рис. 18. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С245, вылет 3 м), кг

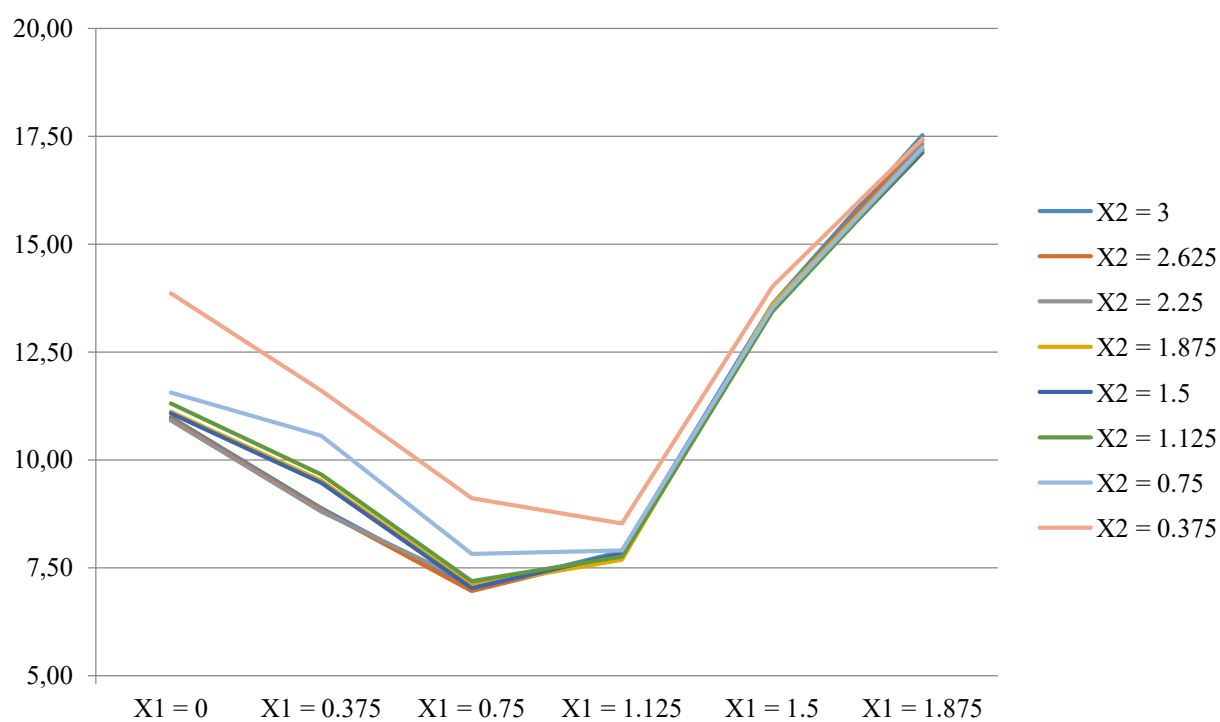


Рис. 19. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

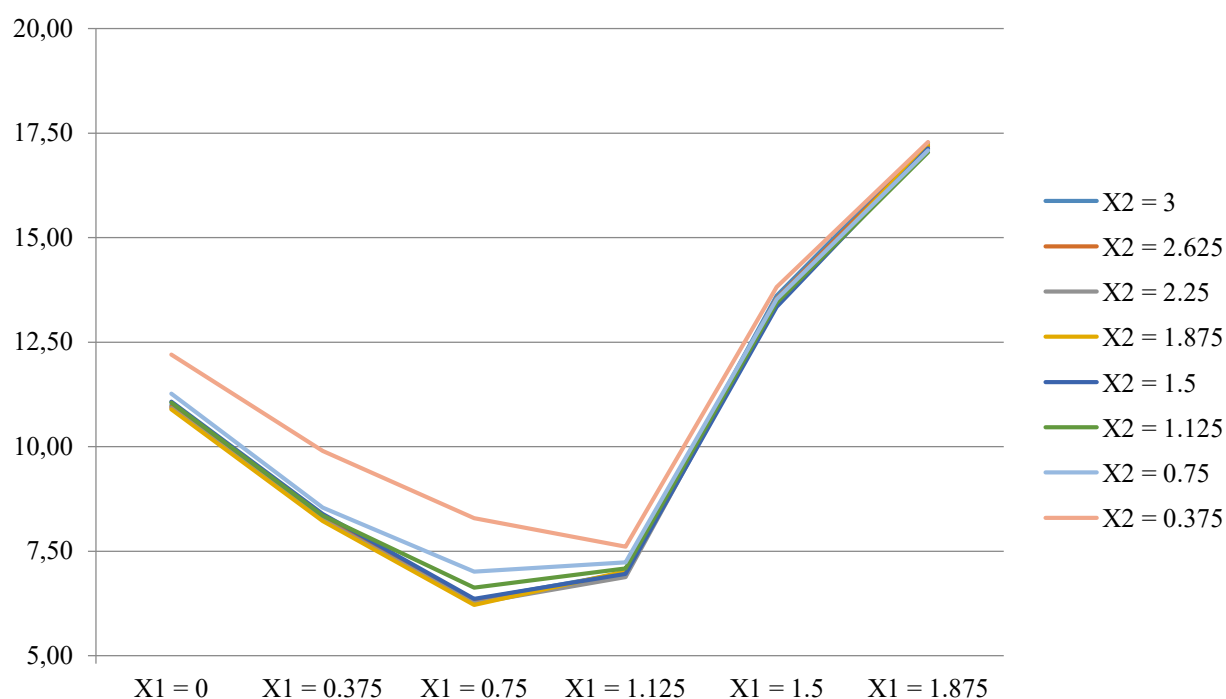


Рис. 20. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С345, вылет 3 м), кг

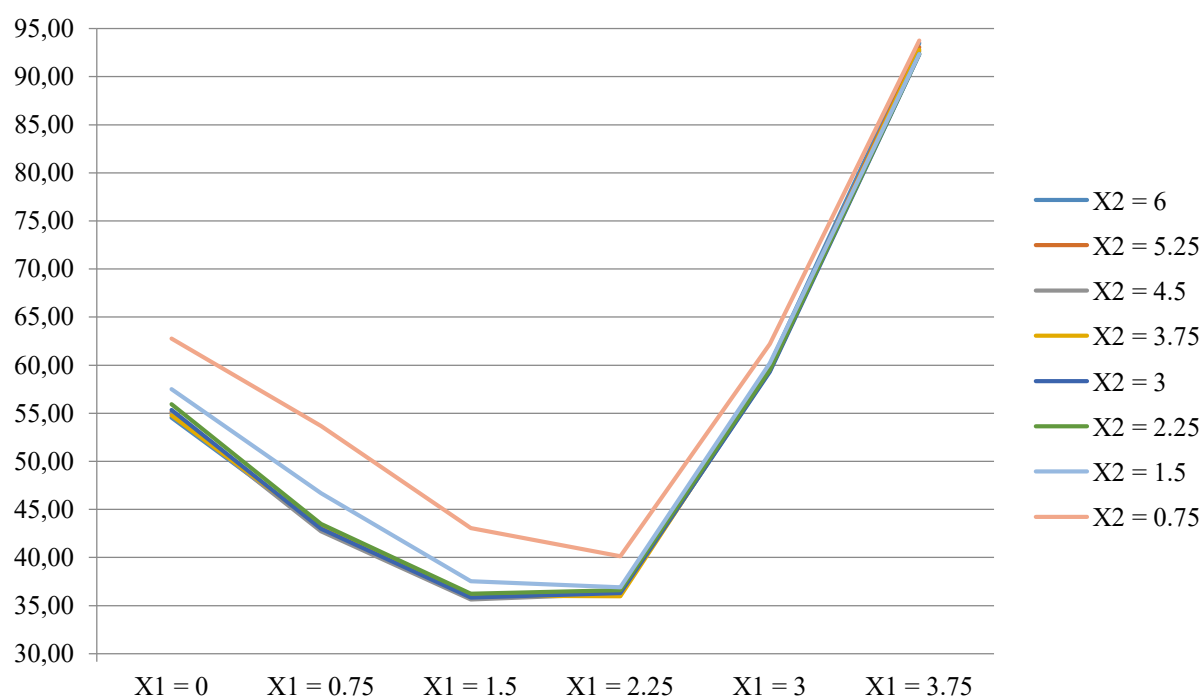


Рис. 21. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

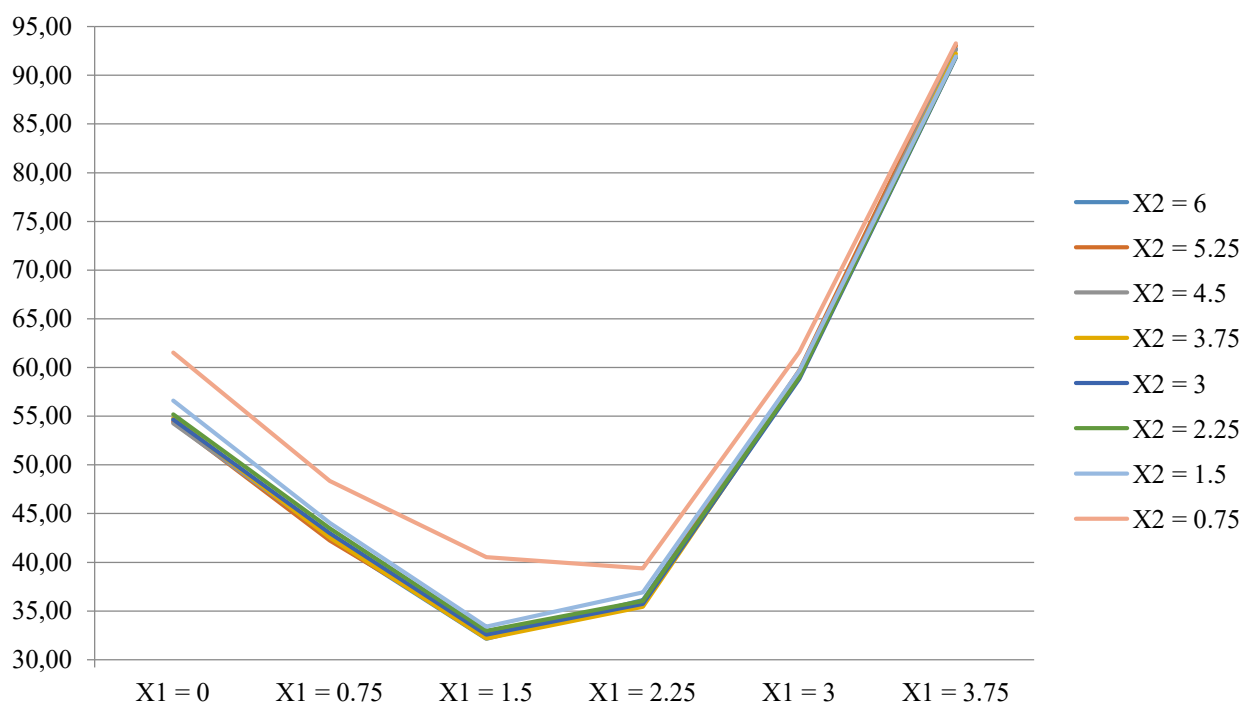


Рис. 22. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

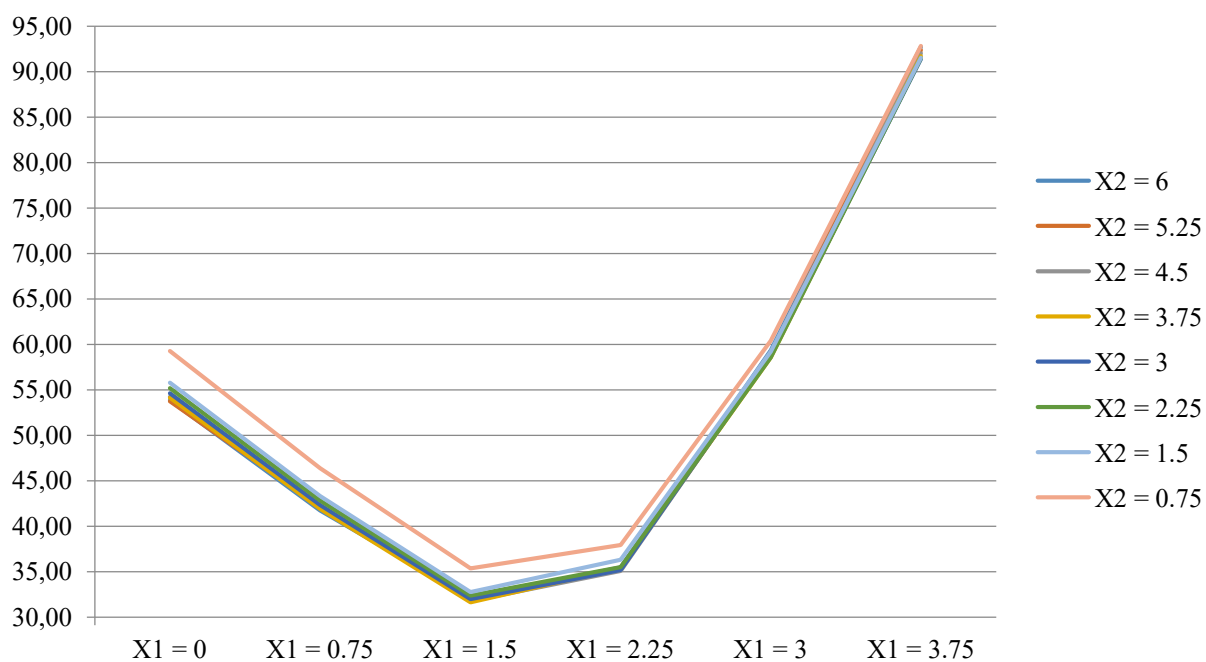


Рис. 23. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

Выводы. Оптимальные геометрические параметры x_1 и x_2 для каждого сочетания сечения балки, класса стали и вылета представлены в таблице 5. Варианты конструкции с использованием швеллера и двутавра исключены из этой части

анализа, так как недонапряжение конструкции искажает результаты. Значения геометрических параметров в таблице даны в долях от вылета балки.

Таблица 5

Значения оптимальных параметров

Сечение	Вылет, м	Класс стали	$X_{1\text{опт}}$	$X_{2\text{опт}}$
Квадратная профильная труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8
Прямоугольная профильная труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8
Круглая труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8

Как видно из таблицы, во всех случаях оптимальным значением X_1 является $X_1 = 2/8L$. Такое значение обеспечивает оптимальное НДС конструкции, при котором металлоемкость конструкции является минимальной. При этом значение X_1 значительно влияет на массу конструкции, как можно увидеть на приведенных выше графиках.

Оптимальное значение X_2 , напротив, варьируется в зависимости от характеристик конструкции. Оптимальными являются значения $5/8L \leq X_2 \leq 8/8L$. При этом изменение X_2 в этих пределах незначительно влияет на массу конструкции.

Подбор сечений элементов конструкции осуществлялся по условиям прочности и общей устойчивости. Ввиду того, что значительная часть подобранных сечений из круглой трубы и ЗГСП имеет толщину в пределах 2–3 мм, весьма вероятно потеря местной устойчивости этих элементов. Поэтому в будущем авторы планируют добавить в алгоритм подбора сечений также условие обеспечения местной устойчивости элементов, что позволит определить наиболее релевантные значения оптимальных размеров конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамразян А.Г., Алексецев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. №1. С. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.

2. Ахмадиев Ф.Г., Маланичев И.В. Популяционные алгоритмы структурно-параметрической оптимизации в строительном проектировании // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 215–223.

3. Бояршинова И.Н., Хусаинов В.С. Оптимальное проектирование конструкций с целью снижения веса // Научно-технический Вестник Поволжья. 2021. № 5. С.64–66.

4. Alpatov V. Search for the optimal shape of metal spatial (space) structures. IOP Conference series materials science and engineering. International science and technology conference on Fareastcon-2019, Vladivostok, 22-50 (2019). doi: 10.1088/1757-899X/753/2/022050.

5. Василькин А.А., Щербина С.В. Построение системы автоматизированного проектирования при оптимизации стальных стропильных ферм // Вестник МГСУ. 2015. №2. С. 21–37

6. Карпенко А.В. Современные проблемы параметрической оптимизации проектных решений в САПР // В сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 3161–3166. DOI: 10.25728/vspu.2019.3166.

7. Туменова И.М. Параметрическая оптимизация трапециевидной деревянной фермы с восходящими раскосами на металлических зубчатых пластинах // Инженерный вестник Дона. 2017. №2(45). С. 131–142

8. Василькин А.А., Зубков Г.В. Металлоемкость структурной плиты покрытия при различных условиях опирания // ИВД. 2021. №2 (74). С. 180–191.

9. Ключев С. В., Ключев А. В., Лесовик Р. В. Оптимальное проектирование стальной пространственной фермы // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 74–79.

10. Василькин А.А. К интегрированию инструментов структурной оптимизации в САПР // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 55–60.

11. Серпик И.Н., Тарасова Н.В. Оптимизация предварительно-напряженных стальных ферм с использованием эволюционного поиска // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 1 (282). С. 58–64.

12. Khomyak Y.U., Naumenko I.E., Zheglova V., Popov V. Minimizing the mass of a flat bottom of cylindrical apparatus // Eastern-European Journal

of Enterprise Technologies. 2018. №2/1 (92). С. 42–50. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126141.

13. Алпатов В.Ю. Пространственное светопрозрачное покрытие со стальным каркасом // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2017. С. 44–47.

14. Brown N.C., Caitlin T. Mueller C.T. Automated performance-based design space simplification for parametric structural design // Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25 - 28th September, 2017, Hamburg.

15. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наук. думка, 1988. 736 с.

Информация об авторах

Василькин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Зубков Георгий Владиславович, студент 6 курса института строительства и архитектуры. E-mail: gronar363@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила 17.05.2022 г.

© Василькин А.А., Зубков Г.В., 2022

**Vasilkin A.A., Subkov G.V.*

Moscow State University of Civil Engineering,

**E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE CANOPY STRUCTURE BY NUMERICAL METHODS

Abstract. The article sets and solves the problem of finding the minimum weight of the canopy structure under the specified design scheme and loading conditions. At the same time, two variants of the design scheme are considered – with a canopy length of 3 and 6 m. The metal consumption of the structure is accepted as the criterion of optimality. The shape of the cross-section of the beam, the strength characteristics of the structural material and the geometric parameters of the structure are selected as variable parameters. The problem is solved by numerical method, for this purpose, by methods of structural mechanics, the forces in the structural elements, displacements and deflections of the beam and suspension are determined, then the obtained formal conditions of strength and stiffness are included in the algorithm on the basis of which a program is developed in one of the programming languages. In fact, the article solves the optimization problem according to the optimality criterion in the form of the cost of the structure, with limitations in the form of overall dimensions and conditions of strength and rigidity. This method will allow to quickly determine the stress of the structure, with a given design scheme, for any size, load and type of elements used. This approach can be considered as one of the applications of the BIM methodology, that is, to automate the process of designing a specific structure and can be used in practical work. It allows to significantly save time designing to find the optimal solution.

Keywords: parametric optimization, optimality criterion, load-bearing capacity, metal consumption.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Alekseev A.V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures [Sovremennyye metody opti-

mizacii konstruktivnyh reshenij dlya nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. Vestnik MGSU. 2020. Vol. 15. No.1. Pp. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. (rus)

2. Ahmadiev F.G., Malanichev I.V. Population-based algorithms of structural and parametric optimization in construction design. [Populyatsionnye algoritmy strukturno-parametricheskoy optimizatsii v stroitel'nom proektirovanii]. News of the KGASU. 2018. No. 2 (44). Pp. 215–223. (rus)
3. Boyarshinova I.N., Husainov V.S. The optimal design of structures to reduce weight. [Optimal'noe proektirovanie konstrukcij s cel'yu snizheniya vesa]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2021. No. 5. Pp. 64–66. (rus)
4. Alpatov V. Search for the optimal shape of metal spatial (space) structures. IOP Conference series materials science and engineering. International science and technology conference on Fareastcon-2019, Vladivostok, 2019. 22–50 doi: 10.1088/1757-899X/753/2/022050. (rus)
5. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Development of a computer-aided design system for optimization of steel trusses [Postroenie sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya pri optimizatsii stal'nyh stropil'nyh ferm]. Vestnik MGSU. 2015. No. 2. Pp. 21–37. (rus)
6. Karpenko A.V. Modern problems of parametric optimization of design solutions in CAD systems [Sovremennye problemy parametricheskoy optimizatsii proektnykh reshenij v SAPR]. Article in the Proceedings of the XIII All-Russian Conference on Management Problems. Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. 2019. Pp. 3161–3166. doi: 10.25728/vspu.2019.3166. (rus)
7. Tumenova I.M. Parametric optimization of a trapezoidal wooden truss with ascending braces on metal toothed plates. [Parametricheskaya optimizatsiya trapecievidnoj derevyannoj fermy s voskhodyashchimi raskosami na metallicheskih zubchatykh plastinah]. Engineering journal of Don. 2017. No. 2 (45). Pp. 131–142. (rus)
8. Vasil'kin A.A., Zubkov G.V. Metal consumption of roofing space grid structures under various support conditions [Metalloemkost' strukturnoj plity pokrytiya pri razlichnykh usloviyakh opiraniya]. Engineering journal of Don. 2021. No. 2 (74). Pp. 180–191. (rus)
9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Lesovik R.V. optimal design of a steel spatial truss. [Optimal'noe proektirovanie stal'noj prostranstvennoj fermy]. Vestnik TGASU. 2008. No. 1. Pp. 74–79. (rus)
10. Vasil'kin A.A. Integration of tools of structural organization into CAD systems. [K integrirovaniyu instrumentov strukturnoj optimizatsii v SAPR]. Industrial and civil engineering. 2018. No. 9. Pp. 55–60. (rus)
11. Serpik I.N., Tarasova N.V. Optimization of pre-stressed steel trusses with the evolutionary search. [Optimizatsiya predvaritel'no-napryazhennykh stal'nykh ferm s ispol'zovaniem evolyucionnogo poiska]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2019. No. 1 (282). Pp. 58–64. (rus)
12. Khomyak Y.U., Naumenko I.E., Zheglola V., Popov V. Minimizing the mass of a flat bottom of cylindrical apparatus. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 2/1 (92). Pp. 42–50. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126141.
13. Alpatov V.Yu. Spatial light-transparent coating with a steel frame. [Prostranstvennoe svetoprozrachnoe pokrytie so stal'nyim karkasom]. Article in the proceedings: Traditions and innovations in construction and architecture. Construction. 2017. Pp. 44–47. (rus)
14. Brown N.C., Caitlin T. Mueller C.T. Automated performance-based design space simplification for parametric structural design. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25–28th September, 2017, Hamburg.
15. Pisarenko G.S. Handbook of Mechanics of Materials [Spravochnik po soprotivleniyu materialov]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 736 p. (rus)

Information about the authors

Vasilkin Andrei A. PhD, associate professor Moscow State (National Research) University of Civil Engineering. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Yaroslavl'skoye Shosse 26, Moscow, Russian Federation, 129337.

Zubkov Georgiy V. Graduate student Moscow State (National Research) University of Civil Engineering. E-mail: gronar363@gmail.com. Yaroslavl'skoye Shosse 26, Moscow, Russian Federation, 129337.

Received 17.05.2022

Для цитирования:

Василькин А.А., Зубков Г.В. Параметрическая оптимизация конструкции навеса численными методами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 34–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49

For citation:

Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Parametric optimization of the canopy structure by numerical methods. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 34–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-50-62

^{1,*}Медведева О.Н., ²Чиликин А.Ю.¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.²ООО «Газпром межрегионгаз Киров»

*E-mail: medvedeva-on@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ, КАПИТАЛЬНОМУ РЕМОНТУ И РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ СЕТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Аннотация. Ограниченность газораспределительных организаций (ГРО) в денежных ресурсах, которые возможно направлять на постоянную модернизацию и поддержание объектов сетей газораспределения в состоянии, обеспечивающем необходимый уровень безопасности, требует решения оптимизационной задачи. В свою очередь задача оптимизации затрачиваемых ресурсов на проведение соответствующих мероприятий требует выбора критериев, относительно которых будет определяться цель проведения мероприятий и оцениваться ее достижение посредством данных мероприятий. Проведен анализ статистики происшествий на объектах сетей газораспределения АО «Газпром газораспределение Киров» за 2016–2021 года. Предложена методика планирования работ по модернизации, капитальному ремонту и реконструкции объектов сети газораспределения с учетом показателя безопасности, основанного на величине параметра потока отказов для различных видов/типов объектов и их фактического технического состояния. Выполнен сбор требуемых исходных данных о фактических значениях искомого показателя безопасности за определенный период и выработан механизм управления затратами ГРО для обеспечения требуемого уровня безопасности сетей газораспределения. Обеспечение надежности сети газораспределения с учетом фактического технического состояния объектов сети газораспределения ГРО в равной степени будет обеспечивать безопасность сети газораспределения.

Ключевые слова: природный газ, безопасность, сеть газораспределения, надежность, газораспределительная организация, безаварийность, отказ.

Введение. Каждая газораспределительная организация при транспортировке газа по сетям газораспределения в соответствии с Регламентом [1] должна обеспечивать безопасность транспортировки. При этом, как элемент бизнеса, каждая ГРО стремится к получению максимальной прибыли, соответственно, минимизации затрат. Безопасность сетей газораспределения характеризуется их безаварийностью [2–6], которая обеспечивается проведением регламентных работ при эксплуатации объектов сетей газораспределения: газопроводов (с располагающимися на них техническими устройствами) и пунктов редуцирования газа в соответствии с действующей нормативной документацией.

Одновременно с этим, в процессе жизненного цикла каждого объекта наступает момент, когда осуществление регламентных работ для сохранения требуемого уровня безопасности уже недостаточно. Требуется проведение полноценной модернизации или проведения капитального ремонта – замены или реконструкции, обновляющих ресурс и уменьшающих риск эксплуатации объекта [7, 8]. Однако данные мероприятия являются дорогостоящими, и, в условиях существующей доходности, ГРО заинтересованы в минимальном объеме проводимых работ [9, 10].

В противном случае деятельность ГРО будет убыточной.

В настоящее время отсутствует эффективный инструмент, позволяющий ГРО оптимально планировать проведение работ по модернизации, капитальному ремонту (замене) и реконструкции объектов газораспределения в случае избыточных или недостаточных затрат, что, в конечном итоге, приводит к снижению уровня безопасности сетей газораспределения [9, 11–14].

Под безопасностью сети газораспределения будем подразумевать отсутствие аварий, при которых происходит разрушение/отказ объектов сети газораспределения, приводящих к любому ущербу.

В действующей нормативной документации отсутствуют требования к показателям безопасности для сетевых организаций, так как предполагается, что безопасность должна быть безусловной. Однако в отношении распределительных сетей понятие безопасности тесно связано, а в случае сетей газораспределения тождественно, с понятием надежности [1, 11, 15–17]. В этой связи следует тщательно рассмотреть существующие нормативные показатели надежности для энергоснабжающих организаций. При этом, данные показатели следует оценивать

неразрывно от показателей качества соответствующих услуг, так как существующая мировая практика подразумевает их совместное регулирование и влияние [4, 18–21].

Показатели надежности и качества услуг, оказываемых в системах распределения энергоресурсов, разрабатываются и применяются в процессе государственного регулирования субъектов естественных монополий в сфере электроэнергетики, теплоэнергетики, газоснабжения, водоснабжения и водоотведения и пр. В свою очередь государственное регулирование естественных монополий в Российской Федерации осуществляется, в том числе и путем установления тарифов на услуги соответствующих организаций.

В настоящее время в РФ применяются следующие методы формирования тарифов:

- экономически обоснованных расходов (затрат);
- обеспечения доходности инвестированного капитала;
- индексации;
- сравнения аналогов.

Показатели надежности и качества оказываемых услуг предусмотрено использовать преимущественно в случае применения метода обеспечения доходности инвестированного капитала [9, 10 и др.]. Действующая федеральная нормативная база позволяет определять тарифы на услуги по транспортировке электрической и тепловой энергии любым из указанных методов. В сфере транспортировки природного газа по газораспределительным сетям в соответствии с нормативными документами тарифы устанавливаются на один год методом экономически обоснованных расходов (затрат) с учетом показателей надежности [Приказ ФСТ России от 15.12.2009 № 411-э/7 «Об утверждении Методических указаний по регулированию тарифов на услуги по транспортировке газа по газораспределительным сетям» (с изменениями на 6 декабря 2021 года)].

Задачей исследования является создание универсального инструмента, позволяющего объективно оценить необходимость и объективность решений по проведению работ по модернизации, капитальному ремонту (замене) и реконструкции объектов газораспределения в рамках отдельной газораспределительной организации. Успешность решения задачи в первую очередь будет зависеть от корректно выбранного критерия (индикатора), определяющего необходимость проведения соответствующих мероприятий.

Таким образом, цель работы можно сформулировать следующим образом – разработка мероприятий по повышению безопасности сети газораспределения в целом. Критерием необходимости проведения работ по модернизации, капитальному ремонту (замене) и реконструкции объектов газораспределения будет являться снижение или недостижение некоторого планового показателя безопасности.

Материалы и методы. При выполнении исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ существующих проблем и возможных решений, создание теоретической и математической модели, методы теоретических исследований.

Значения показателей уровня надежности и качества оказываемых услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям определяют в соответствии с Методикой расчета плановых и фактических показателей надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям, утвержденной Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 15 декабря 2014 года № 926.

Аналогично отраслям тепло- и электроснабжения показатели уровня надежности и качества услуг по транспортировке газа состоят из нескольких плановых и фактических показателей:

- количество и продолжительность прекращений и ограничений транспортировки газа по газораспределительным сетям или показатель количества прекращений транспортировки газа;
- количество недопоставленного газа различным категориям потребителей в результате прекращений и ограничений транспортировки газа по газораспределительным сетям или показатель количества недопоставленного газа.

Уровень качества оказываемых услуг определяется с использованием следующих показателей:

- обеспечение давления в точке подключения потребителей к сети газораспределения в соответствии с техническими условиями на подключение;
- соответствие физико-химических характеристик газа в точке подключения потребителей к сети газораспределения требованиям, установленным в нормативно-технических документах.

Услуга газораспределения является регулируемой во многих странах, что предполагает, в том числе, регулирование качества и надежности, поскольку данный показатель включается в термин «качество» предоставляемой услуги [22–24].

Основная часть. Надежность является мерой обеспеченности газом всех потребителей сети газораспределения и разделяется на долгосрочную меру – пропускную способность сети (в любой момент времени возможность транспортировать требуемое количество газа для каждого потребителя) и краткосрочную меру – операционная надежность (продолжительность перерывов в транспортировке газа при плановых/не плановых отключениях элементов сети газораспределения (перерывах транспортировки газа)). Обеспеченность потребителей определяется показателями надежности, такими как частота и длительность перерывов транспортировки газа. Показатели надежности определяют «среднюю эффективность работы» эксплуатационной организации (например, средняя продолжительность перерыва на одного клиента в год).

В отношении сетей газораспределения показатель надежности будет тождественен показателю безопасности, поскольку любое нарушение работы сети, вызванное не действиями третьих лиц или непреодолимой силой, а техническим состоянием сети газораспределения (то есть тем, на что может оказать влияние ГРО), приносит неминуемый ущерб [8, 13]. Основная цель ГРО – избежать возможности возникновения подобных ситуаций. Управляя показателем надежности сети газораспределения в равной степени, происходит управление показателем ее безопасности.

В соответствии с Техническим регламентом [1] сети газораспределения должны обеспечивать безопасность транспортирования природного газа, которая обеспечивается исправностью сети газораспределения. Параметры, влияющие на исправность сети газораспределения, изменяются из-за деградации свойств материалов, из которых выполнены объекты сети газораспределения, износа технических устройств и воздействия внешних факторов (природно-климатические и техногенные воздействия, вандализм).

Исправное состояние сети газораспределения обеспечивают выполнением ГРО обязательных требований нормативных документов, устанавливающих периодичность и состав работ по мониторингу, техническому обслуживанию и ремонту объектов сети газораспределения. При невозможности или нецелесообразности обеспечения исправного состояния сети газораспределения посредством выполнения технического обслуживания и ремонта (текущего) объектов сети газораспределения, исправное состояние обеспечивают выполнением следующих организационно-технических мероприятий (видов работ) на объектах сети газораспределения: капитальный

ремонт; реконструкция; техническое перевооружение.

Проведенный анализ существующей номенклатуры показателей надежности и качества, применяемых в сетях газораспределения и распределения электроэнергии, регулируемых государственными органами в отношении организаций, выполняющих транспортирование энергетических ресурсов, показывает, что наиболее значимым является показатель надежности работы сети распределения. При этом, относительно весовых коэффициентов составляющих данного показателя самым существенным является показатель, характеризующий потенциальную возможность перебоя поставки ресурса конечному потребителю. Вторичными являются количество непоставленного ресурса и продолжительность перебоя.

Полученные результаты анализа позволяют выполнить сбор требуемых исходных данных о фактических значениях искомого показателя за определенный период и выработать механизм управления затратами ГРО для обеспечения требуемого уровня безопасности сетей газораспределения.

Таким образом, безопасность сети газораспределения количественно можно охарактеризовать показателем безопасности. Основными параметрами, влияющими на значение показателя безопасности сети газораспределения, являются удельные параметры потоков отказов объектов сети газораспределения, зависящие в том числе от их технического состояния. Задав область распространения для понятия «отказ», можно использовать имеющиеся статистические данные для определения численных значений искомого величин.

В качестве отказов объектов сети газораспределения будем рассматривать:

- аварии и инциденты на объектах сети газораспределения;
- нарушения целостности, в том числе:
 - а) разрушение труб и соединительных деталей газопроводов;
 - б) разрушение соединительных деталей и корпусов технических устройств;
- утечки газа из разъемных соединений, которые невозможно устранить без ограничения (прекращения) транспортировки газа потребителям;
- срабатывание отключающей арматуры в ПРГ;
- закупорки газопроводов, приведшие к ограничению (прекращению) транспортировки газа потребителям;

– прочие неисправности газопроводов, соединительных деталей и технических устройств, в том числе вызванных повреждениями, которые невозможно устранить без ограничения (прекращения) транспортировки газа потребителям;

– другие случаи внеплановых ограничений (прекращений) транспортировки газа потребителям, вызванные техническими причинами.

Для каждой сети газораспределения для любого момента или периода времени (в том числе прогнозируемого) может быть рассчитан показатель безопасности сети газораспределения, зави-

сящий от полученных значений удельных параметров потоков отказов и фактического технического состояния каждого объекта, входящего в данную сеть газораспределения (или которые планируется в нее включить в прогнозный период).

Значения удельных параметров потоков отказов газопроводов и ПРГ и долей отказов, приводящих к авариям, приведены в таблицах 1, 2. Численные значения получены при анализе статистики происшествий на объектах сетей газораспределения АО «Газпром газораспределение Киров» за 2016–2021 года.

Таблица 1

Значения удельных параметров потоков отказов газопроводов, (год·км)⁻¹, и долей отказов, приводящих к авариям на подземных стальных, полиэтиленовых и надземных газопроводах

Причина отказов	Межпоселковые газопроводы	Доля отказов, приводящих к авариям	Распределительные газопроводы в населенных пунктах	Доля отказов, приводящих к авариям	Газопроводы-вводы	Доля отказов, приводящих к авариям
Подземные стальные газопроводы						
Антропогенные воздействия	0,000618	0,820	0,000738	0,880	0,000472	0,820
Природные воздействия	0,000284	0,820	0,000094	0,350	0,000183	0,250
Коррозия трубы газопровода	0,000405·k _{гс}	0,500	0,000582·k _{гс}	0,010	0,000987·k _{гс}	0,550
Заводские дефекты	0,000061	0,300	0,000014	0,100	0,000012	0,300
Качество СМР	0,000182	0,830	0,000105	0,970	0,000218	0,190
Другие причины	0,000030	0,500	0,000033	0,500	0,000105	0,500
Надземные газопроводы						
Антропогенные воздействия	0,000558	0,840	0,003893	0,630	0,003375	0,780
Природные воздействия	0,000255	0,770	0,001394	0,510	0,003031	0,500
Коррозия трубы газопровода	0,000012·k _{гс}	0,010	0,00014·k _{гс}	0,001	0,001042·k _{гс}	0,020
Заводские дефекты	0,000016	0,001	0,000019	0,001	0,000011	0,001
Другие причины	0,000112	0,500	0,000065	0,500	0,000602	0,500
Полиэтиленовые газопроводы						
Антропогенные воздействия	0,000548	0,910	0,003342	0,960	0,004493	0,940
Природные воздействия	0,000112	1	0,000053	0,670	0,006700	0,001
Заводские дефекты	0,000012	0,001	0,000014	0,001	0,000067	0,001
Качество СМР	0,000125	1	0,000117	0,640	0,002414	0,027
Другие причины	0,000062	0,500	0,000043	0,500	0,000268	0,500

Примечание: k_{гс} – коэффициент фактического срока службы газопровода

Показатель безопасности в зависимости от варианта расчета, доли единицы, предлагается определять по формуле:

$$P^v = \prod_{i=1}^n P_i^{\text{ар}} \times \prod_{j=1}^m P_j^{\text{ар}}, \quad (1)$$

где $P_i^{\text{ар}}$ – вероятность безаварийной работы i -ого участка газопровода сети газораспределения, доли единицы; v – индекс варианта расчета, определяющий момент времени и условия, при которых выполняется расчет показателя безопасно-

сти сети газораспределения в соответствии с таблицей 3; i – порядковый номер участка газопровода сети газораспределения; n – количество участков газопроводов в сети газораспределения, шт.; j – порядковый номер ПРГ сети газораспре-

деления; m – количество ПРГ в сети газораспределения, шт; P_j^{ar} – вероятность безаварийной работы j -ого ПРГ сети газораспределения, доли единицы.

Таблица 2

Значения удельных параметров потоков отказов ПРГ, (год)⁻¹, и долей отказов, приводящих к авариям

Характер отказа	ГРП/ГРПБ без автоматических резервных линий редуцирования	Доля отказов, приводящих к аварии	ГРП/ГРПБ с автоматическими резервными линиями редуцирования	Доля отказов, приводящих к аварии	ГРПШ без автоматических резервных линий редуцирования	Доля отказов, приводящих к аварии	ГРПШ с автоматическими резервными линиями редуцирования	Доля отказов, приводящих к аварии
Утечка газа	0,00190	0,02	0,00190	0,02	0,00220	0,01	0,00190	0,01
Отказ регулятора давления	0,00261	0,05	–		0,00261	0,05	–	
Отказ оборудования	0,00500	0,10	0,00040	0,05	0,00022	0,10	0,00012	0,05
Прочие отказы	0,00038	0,02	0,00038	0,01	0,00045	0,02	0,00022	0,01

Таблица 3

Моменты времени и условия, при которых выполняют расчеты показателей безопасности и надежности сети газораспределения

Индекс варианта расчета	Момент времени	Условия расчета
пд	До проведения работ по капитальному ремонту, реконструкции или техническому перевооружению на всех объектах сети газораспределения	При расчете следует учитывать все объекты сети газораспределения, которые находятся в эксплуатации на момент планирования, со сроком службы на момент завершения периода планирования, а также объекты, которые будут введены в эксплуатацию в период планирования
пп ij	После проведения работ по капитальному ремонту, реконструкции или техническому перевооружению (j -ого вида работ) на i -ом объекте сети газораспределения до завершения периода планирования	

Вероятность безаварийной работы i -ого участка газопровода сети газораспределения определяется по формуле:

$$P_i^{ar} = \left(\prod_{i=1}^n e^{-\sum_j (\omega_i^{jk} \cdot \lambda_{ijk}^r \cdot L_i \cdot B_{ik} - 0,000001 \cdot z)} \right), i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где ω_i^{jk} – значение удельного параметра потоков отказов i -ого участка газопровода k -ого типа по j -ой причине, (год·км)⁻¹; j – индекс причины отказа газопровода; k – индекс типа газопровода, типы газопроводов определяют исходя из места расположения, положения относительно поверхности земли и материала трубы газопровода (табл. 1); λ_{ijk}^r – доля отказов по j -ой причине, приводящих к аварии на i -ом участке газопровода k -ого типа,

доли единицы; L_i – протяженность i -ого участка газопровода, км; B_{ik} – балльная оценка i -ого участка газопровода k -ого типа, определяется по рекомендациям СТО Газпром 2-2.3-351-2009; z – количество арматуры трубопроводной с истекшим сроком службы, установленной на i -ом участке газопровода, шт; n – количество газопроводов в сети газораспределения, шт.

Вероятность безаварийной работы j -ого ПРГ сети газораспределения определяется по формуле:

$$P_j^{ar} = \left(\prod_{j=1}^m e^{-\sum_z (\omega_j^{zk} \cdot \lambda_{jzk}^r \cdot B_{jk} - 0,000001 \cdot w)} \right), j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где z – индекс характера отказа ПРГ; ω_j^{zk} – значение удельного параметра потоков отказов z -ого

характера j -ого ПРГ k -ого типа, $(\text{год})^{-1}$; k – индекс типа ПРГ, тип ПРГ определяется исходя из конструктивных особенностей (табл. 2); λ_{izk}^T – доля отказов z -ого характера, приводящих к аварии на ПРГ, доли единицы; V_{jk} – балльная оценка j -ого ПРГ k -ого типа, определяется по рекомендациям СТО Газпром 2-2.3-351-2009; w – количество технических устройств с истекшим сроком службы, установленной в j -ом ПРГ, шт; n – количество ПРГ в сети газораспределения, шт.

Модернизация, капитальный ремонт или реконструкция объектов сети газораспределения неизбежно улучшает техническое состояние, а, следовательно, влияет на значение показателя безопасности сети в целом. Определяя фактическое значение существующей сети газораспределения и, сравнивая его с целевым значением, можно определить необходимость выполнения тех или иных мероприятий на каждом объекте сети газораспределения.

Основываясь на результатах проведенного анализа, в качестве целевого значения показателя безопасности целесообразно выбрать величину обязательного прироста показателя безопасности

относительно достигнутого в текущем году уровня по сравнению с предыдущим годом.

Целевое значение показателя безопасности сети газораспределения, доли единицы, предлагается определять по формуле:

$$P^u = P^{пл} \cdot k^p, \quad (4)$$

где $P^{пл}$ – прогнозируемое значение показателя безопасности сети газораспределения в завершении периода планирования при условии, что ни на одном объекте сети газораспределения не выполнены капитальный ремонт, реконструкция или техническое перевооружение, доли единицы; k^p – целевой коэффициент, определяемый по табл. 4, исходя из выполнения неравенства:

$$\sum_{i=1}^{365} a_i < \sum_{i=366}^{730} a_i, \quad (5)$$

где i – порядковый номер суток до момента составления текущего плана проведения работ; a_i – удельное количество аварий в сети газораспределения в i -ые сутки до момента составления текущего плана работ, шт/км.

Таблица 4

Значения целевого коэффициента k^p

Неравенство (5)	Значение k^p
Выполняется	1,001
Не выполняется	1,002

Необходимо определить ожидаемый прирост показателя безопасности сети газораспределения в результате выполнения работ по капитальному ремонту, реконструкции или техническому перевооружению объектов сети газораспределения в завершении периода планирования ΔP , доли единицы, по формуле:

$$\Delta P = P^u - P^{пл}, \quad (6)$$

где P^u – целевое значение показателя безопасности сети газораспределения, доли единицы.

Оптимальным планом проведения работ будет являться такой минимальный набор объектов сети газораспределения с конкретным видом работ по каждому объекту, который обеспечит достижение целевого значения показателя безопасности сети газораспределения, то есть выполнение неравенства:

$$\Delta P \leq \sum_{i=1}^n (\Delta P_{ij}^o \cdot x_{ij}), \quad (7)$$

где i – порядковый номер объекта сети газораспределения; n – количество объектов сети газораспределения, шт; j – индекс вида работ – капитальный ремонт, реконструкция или техническое

перевооружение; ΔP_{ij}^o – прирост показателя безопасности сети газораспределения в результате выполнения j -ого вида работ на i -ом объекте, доли единицы; x_{ij} – переменная, принимающая значение «1» при выборе i -ого объекта сети газораспределения и j -ого вида работ на i -ом объекте, «0» – в случае если i -ый объект сети газораспределения или j -ый вид работ на объекте не выбраны.

Прирост показателя безопасности сети газораспределения в результате выполнения j -ого вида работ на i -ом объекте ΔP_{ij}^o , доли единицы, определяется по формуле:

$$\Delta P_{ij}^o = P_{ij}^{пл} - P^{пл}, \quad (8)$$

где $P_{ij}^{пл}$ – прогнозируемое значение показателя безопасности сети газораспределения в завершении периода планирования при условии, что на i -ом объекте сети газораспределения выполнен j -ый вид работ, доли единицы.

При этом, имея ограниченные объемы денежных средств на выполнение данных работ, очевидно, что ГРО должны обладать правилом

определения оптимального набора объектов, на которых необходимо проводить данные работы.

Сам факт отказа сети газораспределения, хоть и является наиболее значимым событием по результатам проведенного анализа, не будет единственным, который следует учитывать при управлении показателем безопасности. Отсутствие подачи газа для некоторых категорий потребителей является однозначно недопустимым (предприятия с непрерывным производственным циклом). Часть потребителей обеспечивает население другими коммунальными ресурсами, выработка которых происходит за счет сжигания газа (электричество, ГВС, отопление), и нарушение транспортировки газа для данных потребителей также является существенным негативным событием, которого следует избегать. Одновременно с этим, в договорах на транспортировку газа могут быть предусмотрены штрафные санкции для ГРО в случае непоставки газа. Кроме того, непосредственно количество передаваемого газа является основанием для получения ГРО тарифа за транспортировку газа по сетям газораспределения.

Таким образом, при планировании работ по модернизации, капитальному ремонту и реконструкции объектов сети газораспределения с применением показателя безопасности следует учитывать, в том числе характеристики объектов, которые снабжаются газом (потребителей газа). Объекты сети газораспределения различаются по степени своей ответственности в обеспечении безопасности конкретной сети газораспределения в целом, и оцениваться они должны с учетом этой значимости. Под степенью ответственности объекта сети газораспределения понимается комплексный показатель, характеризующий совокупность назначения потребителей газа, которым транспортируется газ через данный объект сети газораспределения, в федеральном и региональном масштабе, доли дохода ГРО от транспортировки газа по данному объекту сети газораспределения и потенциальный материальный ущерб ГРО в случае отказа объекта.

Проанализировав все характеристики снабжаемых объектов газом, а также объемы и условия транспортируемого газа, для каждого объекта сети газораспределения в настоящей работе предлагается ранжирование объектов сети газораспределения по степени ответственности, приведенной в таблице 5. Чем ответственнее объект сети газораспределения, тем выше его класс.

Кроме того, на части объектов в обязательном порядке должны проводиться процедуры по капитальному ремонту или реконструкции в рамках решений по результатам регламентных работ

на данных объектах или требований нормативных правовых актов.

Выбор объектов сети газораспределения, подлежащих капитальному ремонту, реконструкции или техническому перевооружению, и конкретного организационно-технического мероприятия (вида работ) для каждого объекта для обеспечения достижения целевого значения показателя безопасности сети газораспределения выполняют на основании оценки эффективности проведения на каждом объекте каждого организационно-технического мероприятия (вида работ) при условии возможности (технической и экономической) их проведения.

При этом в план проведения работ целесообразно включать такие объекты сети газораспределения и виды работ на них, для которых показатель эффективности j -ого вида работ на i -ом объекте $\mathfrak{E}_{ij}^6$, км⁻¹ (шт.⁻¹) максимальный. Показателем эффективности организационно-технических мероприятий (видов работ) на объектах сети газораспределения является удельный прирост показателя безопасности сети газораспределения в результате выполнения данных мероприятий (видов работ) с учетом класса объекта.

Показатель эффективности j -ого вида на i -ом объекте сети газораспределения, км⁻¹ (шт.⁻¹):

$$\mathfrak{E}_{ij}^6 = \frac{\Delta P_{ij}^o \times x_i^j}{L_i \times k_i^k}, \quad (9)$$

где L_i – протяженность i -ого объекта сети газораспределения, км. Для ПРГ принимает значение «1»; k_i^k – коэффициент класса для i -ого объекта сети газораспределения, определяемый по таблице 3.

Очевидно, что для ГРО, выполняющего эксплуатацию тысячи газопроводов и ПРГ, выполнение изложенных расчетов крайне затруднительно. С целью автоматизации требуемых расчетов разработано специальное программное обеспечение, позволяющее по имеющимся исходным данным определить необходимость выполнения мероприятий, а также определить перечень конкретных газопроводов и ПРГ, на которых данные мероприятия должны быть проведены. Программный модуль позволяет импортировать исходные данные для расчета.

Для возможности выполнения расчетов созданы специальные формы для заполнения исходных данных в формате MS Excel. Для каждой ячейки форм заданы правила заполнения исходной информации, исключающие внесение некорректных сведений. Программный модуль автоматически проверяет формат внесенной информации в каждую конкретную ячейку. Если формат

внесенной информации не совпадает с предусмотренными правилами форматом, пользователю будет выдано соответствующее уведомление. Расчет при этом не возможен до устранения несоответствия. После расчета показателей безопас-

ности сети подтверждается корректность внесенной информации и становится доступна функция расчетов и составления оптимального плана работ по модернизации, капитальному ремонту и реконструкции (рис. 1).

Таблица 5

Классификатор объектов сети газораспределения

Но- мер класса	Признаки класса	Коэффициент класса k^k
I	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением свыше 0,6 МПа в населенных пунктах	1
	Транспортировка газа до объектов тепло- и электроэнергетики: ТЭС, ГРЭС, ГЭС, ТЭЦ, районные котельные с расходом газа свыше 10 тыс. м³/ч	
II	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением свыше 0,3 до 0,6 МПа в населенных пунктах	1,3
	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением свыше 0,6 МПа за пределами населенных пунктов	
	Транспортировка газа до промышленных объектов с непрерывным технологическим процессом	
III	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением свыше 0,005 до 0,3 МПа в населенных пунктах	1,5
	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением свыше 0,3 до 0,6 МПа за пределами населенных пунктов	
	Транспортировка газа до объектов социального назначения (больницы, школы, детские сады и др.), в т.ч. объектов теплоэнергетики, снабжающие теплом объекты социального назначения	
	Транспортировка газа до объектов социального назначения (больницы, школы, детские сады и др.), в т.ч. объектов теплоэнергетики, снабжающие теплом объекты социального назначения	
V	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением не более 0,005 МПа в населенных пунктах	2
	Транспортировка (редуцирование) газа с рабочим давлением не более 0,3 МПа за пределами населенных пунктов	
	Транспортировка газа до прочих потребителей	

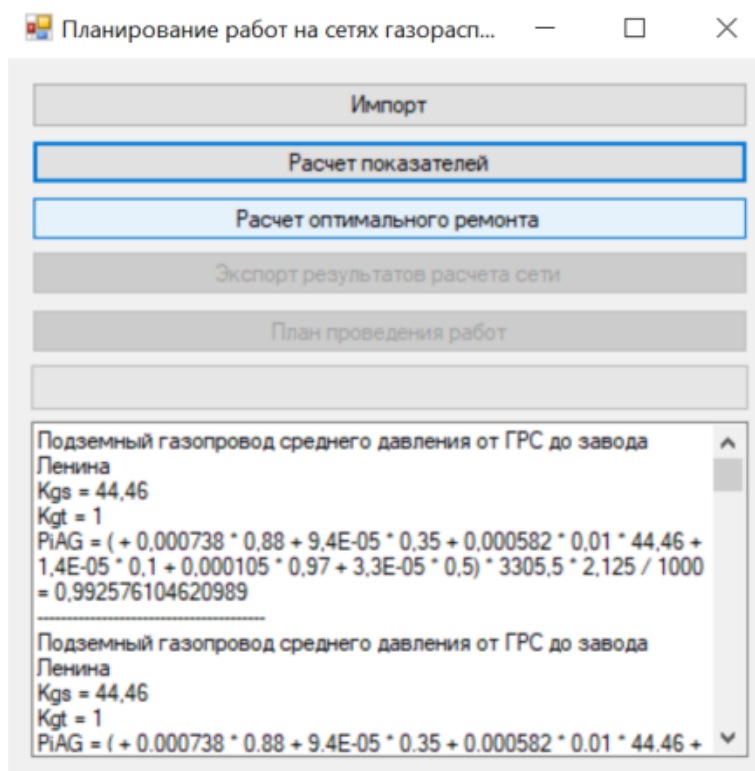


Рис. 1. Результаты расчета показателей

Ниже в качестве примера приведен перечень исходных данных для типа объектов «Газопроводы». Для всех участков газопроводов, незави-

симо от материала труб, из которых они построены, в обязательном порядке заполняются столбцы:

Населенный пункт	Идентификатор (Инвентарный номер/номер эксплуатационного паспорта)	Наименование объекта в соответствии с паспортом	Материал трубы газопровода	Тип газопровода	Место расположения газопровода	Способ прокладки газопровода	Расположение по карте-схеме от ПК ___ до ПК ___	Протяженность, м	Давление газа рабочее, МПа	Наружный диаметр газопровода, мм	Год ввода газопровода в эксплуатацию, год	Наличие особых природных и климатических условий	Характеристика потребителей, до которых транспортируется газ
------------------	--	---	----------------------------	-----------------	--------------------------------	------------------------------	---	------------------	----------------------------	----------------------------------	---	--	--

Для стальных подземных газопроводов дополнительно заполняются столбцы:

Опасное влияние блуждающих токов	Коррозионная агрессивность грунта	Количество выявленных случаев сквозных коррозионных повреждений (СКП) металла трубы газопровода за все время эксплуатации	Рост удельного количества СКП, выявленных за последние 5 лет по сравнению с предыдущим пятилетием	Количество выявленных случаев повреждения защитного покрытия (ПЗП) за все время эксплуатации	Рост удельного количества ПЗП, выявленных за последние 5 лет по сравнению с предыдущим пятилетием	Результаты последнего технического обследования газопровода					
						адгезия защитного покрытия	переходное сопротивление защитного покрытия	комплексный показатель защищенности газопровода средствами ЭХЗ	выявленные повреждения защитного покрытия	выявленные коррозионные повреждения газопровода	выявленные дефекты сварных соединений

Выводы.

1. По результатам проведенного анализа требований нормативной документации в отношении регулирования безопасности, надежности и качества предоставляемых услуг газораспределительными организациями показал, было установлено, что показатель надежности, характеризующий фактическую вероятность нарушения поставки транспортируемого ресурса, является достаточно весомым показателем для сети газораспределения, необходимо регулировать, поскольку, обеспечивая надежность сети газораспределения с учетом фактического технического состояния объектов сети газораспределения, ГРО в равной степени будет обеспечивать безопасность сети газораспределения.

2. В качестве критерия, относительно которого следует планировать работы по модернизации, капитальному ремонту и реконструкции объектов сети газораспределения, предлагается использовать показатель безопасности, основанный на величине параметра потока отказов для различных видов/типов объектов и их фактического технического состояния.

3. Разработанная методика (алгоритм) планирования мероприятий на любой период времени позволяет полноценно определить фактические, целевые и плановые показатели безопасности сети, принять решение о достаточности уровня планируемого показателя безопасности относительно целевого значения, и принять решение о необходимости проведения мероприятий на конкретных газопроводах и пунктах редуцирования газа. Трудоемкость выполнения расчетов в полной мере компенсируется специально разработанным программным модулем. Использование методики возможно, как в целях формирования плана работ для каждой конкретной ГРО, так и в качестве инструмента регулирования затрат ГРО для единой управляющей компании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 29 октября 2010 г. N 870 «Об утверждении технического регламента о безопасности сетей газораспределения и газопотребления». [Электронный

- ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902243701> (дата обращения: 01.03.2022).
2. Фастов Л.М., Медведева О.Н. Надежность систем газоснабжения. Саратов: СГТУ, 2012. 148 с.
3. Жила В.А., Гусарова Е.А., Гулюкин М.Д. Способы повышения надёжности систем газораспределения в городском строительстве // Инновации и инвестиции. 2017. №11. С. 139–141.
4. Alzbutas R., Iesmantas T., Povilaitis M., Vitkutė J. Risk and uncertainty analysis of gas pipeline failure and gas combustion consequence // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014. No. 28. Pp. 1431–1446. doi: 10.1007/s00477-013-0845-4.
5. PHMSA Pipeline Failure Investigation Reports, U.S. Department of Transportation, Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration, Data & Statistic. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/> (дата обращения: 01.03.2022).
6. Кускильдин Т.Р., Дмитриев М.Е., Мастобаев Б.Н. Актуальные проблемы развития газовых сетей и основные направления повышения эксплуатационной надёжности газораспределительных систем // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 3. С. 40–45.
7. Uspuras E., Rimkevicius S., Povilaitis M., Iesmantas T., Alzbutas R. Hazard analysis and consequences assessment of gas pipeline rupture and natural gas explosion // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2011. doi: 10.2495/RAV110451.
8. Aulia R., Tan H., Sriramula S. Dynamic reliability model for subsea pipeline risk assessment due to third-party interference // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 277–289. doi:10.1016/j.jpse.2021.09.006.
9. Самедова Э.Н., Глущенко А.В. Разработка многоцелевой системы учета затрат вертикально интегрированных газораспределительных организаций // Science Journal of VolSU. Global Economic System. 2012. №1 (20). С. 252–260.
10. Сижажева С.С., Цалиева Е.В. Классификация производственных затрат в газораспределении // Вестник Чебоксарского кооперативного института. 2010. №1. С. 64–67.
11. Торчинский Я.Л. Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем. Л.: Недра, 1988. 240 с.
12. He Z., Zhou W. Fatigue reliability analysis of dented pipelines // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 290–297. doi:10.1016/j.jpse.2021.08.004.
13. Khan F., Yarveisy R., Abbassi R. Cross-country pipeline inspection data analysis and testing of probabilistic degradation models // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 308–320. doi:10.1016/j.jpse.2021.09.004.
14. Orasheva J. The Effect of Corrosion Defects on the Failure of Oil and Gas Transmission Pipelines: A Finite Element Modeling Study. UNF Graduate Theses and Dissertations. 2017. 117 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://digitalcommons.unf.edu/etd/763>. (дата обращения: 01.03.2022).
15. Mahmoodian M., Chun Q. Li. Chapter 11. Stochastic failure analysis of defected oil and gas pipelines // Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry. Butterworth-Heinemann. 2016. Pp. 235–255. doi:10.1016/B978-0-08-100117-2.00014-5.
16. Peng Xing-yu, Yao Dong-chi, Liang Guangchuan, Yu Jian-sheng, He Sha. Overall reliability analysis on oil/gas pipeline under typical third-party actions based on fragility theory // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. Pp. 993–1003. doi:10.1016/j.jngse.2016.07.060.
17. Kraidi L., Shah R., Matipa W., Borthwick F. An investigation of mitigating the safety and security risks allied with oil and gas pipeline projects // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 349–359. doi: 10.1016/j.jpse.2021.08.002.
18. Bariha N., Mishra I. M., Srivastava V. C. Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 40. Pp. 217–226. doi:10.1016/j.jlp.2015.12.025.
19. El-Abbasy M.S., Senouci A., Zayed T., Mirahadi F., Parvizsedghy L. Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines // Automation in Construction. 2014. Vol. 45. Pp. 50–65. doi:10.1016/j.autcon.2014.05.003.
20. Guo C., Khan, F., Imtiaz, S. Risk assessment of process system considering dependencies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 55. Pp. 204–212. doi:10.1016/j.jlp.2018.06.014.
21. Guo Y., Meng X., Wang D., Meng T., Liu S., He, R. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 33. Pp. 18–29. doi:10.1016/j.jngse.2016.04.052.
22. Kabir S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis // Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 77. Pp. 114–135. doi:10.1016/j.eswa.2017.01.058.
23. Shan K., Shuai J., Xu K., Zheng W. Failure probability assessment of gas transmission pipelines

based on historical failure-related data and modification factors // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 52. Pp. 356–366. doi:10.1016/j.jngse.2018.01.049.

24. Yang E.-N., Fu C.-M., Dong C., Qu S., Tian J.-F., Zhang Z.-F. Failure analysis of a leaked oil pipeline // Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 4. Pp. 88–93. doi:10.1016/j.csefa.2015.09.004.

Информация об авторах

Медведева Оксана Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела. E-mail: medvedeva-on@mail.ru. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77.

Чиликин Александр Юрьевич, генеральный директор. E-mail: chilikin.063@gmail.com. ООО «Газпром межрегионгаз Киров». Россия, 610004, Киров, ул. Казанская, д. 18.

Поступила 20.03.2022 г.

© Медведева О.Н., Чиликин А.Ю., 2022

^{1,*}Medvedeva O.N., ²Chilikin A.Yu.

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

²Gazprom Mezhhregiongaz Kirov LLC

*E-mail: medvedeva-on@mail.ru

DEVELOPMENT OF ACTIVITIES TO IMPROVE THE SECURITY OF THE GAS DISTRIBUTION NETWORK

Abstract. The limitation of gas distribution organizations (GDO) in financial resources that can be directed to continuous modernization and maintenance of gas distribution network facilities in a condition that provides the necessary level of safety requires solving an optimization problem. In turn, the task of optimizing the resources spent on carrying out the relevant activities requires the selection of criteria against which the goal of the activities will be determined and its achievement through these activities will be assessed. The analysis of accident statistics at gas distribution network facilities of JSC Gazprom Gas Distribution Kirov for 2016–2021 is carried out. A methodology for planning work on modernization, overhaul and reconstruction of gas distribution network facilities is proposed. It takes into account the safety indicator based on the value of the failure rate parameter for various types/types of facilities and their actual technical condition. The required initial data on the actual values of the desired safety indicator for a certain period are collected and a mechanism for managing the GDO costs is developed to ensure the required level of safety of gas distribution networks. Ensuring the reliability of the gas distribution network, taking into account the actual technical condition of the gas distribution network facilities, the GDO will equally ensure the safety of the gas distribution network.

Keywords: natural gas, safety, gas distribution network, reliability, gas distribution organization, accident-free operation, failure.

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation of October 29, 2010. No. 870 "On approval of the technical regulation on the security of gas distribution and gas consumption networks" [Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 29 oktyabrya 2010. N 870 «Ob utverzhdenii tekhnicheskogo reglamenta o bezopasnosti setej gazoraspredeleniya i gazopotrebleniya»]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902243701> (date of treatment: 01.03.2022). (rus)
2. Fastov L.M., Medvedeva O.N. Reliability of gas supply systems [Nadezhnost' sistem gazosnabzheniya]. Saratov: SSTU, 2012. 148 p. (rus)
3. Zhila V.A., Gusarova E.A., Gulyukin M.D. Ways to improve the reliability of gas distribution systems in urban construction [Sposoby povysheniya

nadozhnosti sistem gazoraspredeleniya v gorodskom stroitel'stve]. Innovation and investment. 2017. No. 11. Pp. 139–141. (rus)

4. Alzbutas R., Iesmantas T., Povilaitis M., Vitkutė J. Risk and uncertainty analysis of gas pipeline failure and gas combustion consequence. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014. No. 28. Pp. 1431–1446. doi:10.1007/s00477-013-0845-4.

5. PHMSA Pipeline Failure Investigation Reports, U.S. Department of Transportation, Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration, Data & Statistic. 2021. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/> (date of treatment: 01.03.2022).

6. Kuskildin T.R., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. Actual problems of development of gas net-

works and the main directions for improving the operational reliability of gas distribution systems [Aktual'nyye problemy razvitiya gazovyykh setey i osnovnyye napravleniya povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti gazoraspredeletel'nykh]. Transport and storage of petroleum products and hydrocarbons. 2016. No. 3. Pp. 40–45. (rus)

7. Uspuras E., Rimkevicius S., Povilaitis M., Iesmantas T., Alzbutas R. Hazard analysis and consequences assessment of gas pipeline rupture and natural gas explosion. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2011. doi:10.2495/RAV110451.

8. Aulia R., Tan H., Sriramula S. Dynamic reliability model for subsea pipeline risk assessment due to third-party interference. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 277–289. doi:10.1016/j.jpse.2021.09.006.

9. Samedova E.N., Glushchenko A.V. Development of a multi-purpose cost accounting system for vertically integrated gas distribution organizations [Razrabotka mnogotselevoy sistemy ucheta zatrat vertikal'no integrirovannykh gazoraspredeletel'nykh organizatsiy]. Science Journal of VolSU. Global Economic System. 2012. No. 1 (20). Pp. 252–260. (rus)

10. Sizhazheva S.S., Tsalieva E.V. Classification of production costs in gas distribution [Klassifikatsiya proizvodstvennykh zatrat v gazoraspredele-nii]. Bulletin of the Cheboksary Cooperative Institute. 2010. No. 1. Pp. 64–67. (rus)

11. Torchinsky Ya.L. Optimization of designed and operated gas distribution systems [Optimizatsiya proyektiruyemykh i ekspluatiruyemykh gazoraspredeletel'nykh sistem]. Leningrad: Nedra, 1988. 240 p. (rus).

12. He Z., Zhou W. Fatigue reliability analysis of dented pipelines. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 290–297. doi:10.1016/j.jpse.2021.08.004.

13. Khan F., Yarveisy R., Abbassi R. Cross-country pipeline inspection data analysis and testing of probabilistic degradation models. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 308–320. DOI:10.1016/j.jpse.2021.09.004.

14. Orasheva J. The Effect of Corrosion Defects on the Failure of Oil and Gas Transmission Pipelines: A Finite Element Modeling Study. UNF Graduate Theses and Dissertations. 2017. 117 p. <https://digitalcommons.unf.edu/etd/763>. (data of treatment: 01.03.2022).

15. Mahmoodian M., Chun Q. Li. Chapter 11. Stochastic failure analysis of defected oil and gas pipelines. Handbook of Materials Failure Analysis

with Case Studies from the Oil and Gas Industry. Butterworth-Heinemann. 2016. Pp. 235–255. doi:10.1016/B978-0-08-100117-2.00014-5.

16. Peng Xing-yu, Yao Dong-chi, Liang Guang-chuan, Yu Jian-sheng, He Sha. Overall reliability analysis on oil/gas pipeline under typical third-party actions based on fragility theory. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. Pp. 993–1003. doi:10.1016/j.jngse.2016.07.060.

17. Kraidt L., Shah R., Matipa W., Borthwick F. An investigation of mitigating the safety and security risks allied with oil and gas pipeline projects. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. Vol. 1. Iss. 3. Pp. 349–359. doi:10.1016/j.jpse.2021.08.002.

18. Bariha N., Mishra I. M., Srivastava V. C. Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 40. Pp. 217–226. doi:10.1016/j.jlp.2015.12.025

19. El-Abbasy M.S., Senouci A., Zayed T., Mirahadi F., Parvizsedghy L. Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines. Automation in Construction. 2014. Vol. 45. Pp. 50–65. doi:10.1016/j.autcon.2014.05.003.

20. Guo C., Khan, F., Imtiaz, S. Risk assessment of process system considering dependencies Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 55. Pp. 204–212. doi:10.1016/j.jlp.2018.06.014.

21. Guo Y., Meng X., Wang D., Meng T., Liu S., He, R. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 33. Pp. 18–29. doi:10.1016/j.jngse.2016.04.052.

22. Kabir S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 77. Pp. 114–135. doi:10.1016/j.eswa.2017.01.058.

23. Shan K., Shuai J., Xu K., Zheng W. Failure probability assessment of gas transmission pipelines based on historical failure-related data and modification factors. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 52. Pp. 356–366. doi:10.1016/j.jngse.2018.01.049.

24. Yang E.-N., Fu C.-M., Dong C., Qu S., Tian J.-F., Zhang Z.-F. Failure analysis of a leaked oil pipeline. Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 4. Pp. 88–93. doi:10.1016/j.csefa.2015.09.004.

Information about the authors

Medvedeva, Oksana N. DSc, Assistant professor. E-mail: medvedeva-on@mail.ru. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Russia, 410054, Saratov, st. Politekhnikeskaya, 77.

Chilikin, Alexander Yu. General Director. E-mail: chilikin.063@gmail.com. Gazprom Mezhtregiongaz Kirov LLC. Russia, 610004, Kirov, st. Kazanskaya, 18.

Received 20.03.2022

Для цитирования:

Медведева О.Н., Чиликин А.Ю. Разработка методики планирования мероприятий по модернизации, капитальному ремонту и реконструкции объектов сети газораспределения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-50-62

For citation:

Medvedeva O.N., Chilikin A.Yu. Development of activities to improve the security of the gas distribution network. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-50-62

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-63-76

Цепилова О.П.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: tsepilova.art@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРИ ПОВТОРНОЙ АДАПТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Современные условия растущих тенденций устойчивого развития равновесных изменений экономических и социокультурных связей характеризуют взаимосвязь в потребительском отношении к эстетическим, временным, экономическим, социальным и другим ценностям. Грамотное прогнозирование, направленное на удовлетворение потребительского запроса и сохранение окружающей среды, раскрывает разнообразие вариативности успешной реализации своих проектных предложений перед архитекторами. Таким образом повышается актуальность повторного использования утративших первоначальную функцию зданий, которая является практическим решением для устойчивого развития городов. Это влечет за собой рост потребностей в поиске реально возможных путей автоматизации процессов рефункционализации архитектурных объектов.

В ходе данной работы были изучены различные принципы математического и информационного моделирования, основанные на вариациях метода многокритериального принятия решений (MCDM), проектировании BIM-моделирования в условиях повторной адаптации объектов культурного наследия и других. Было установлено, что в зависимости от типологии объектного применения, эти методы требуют более конкретной проработки, конкретизации весов экспертной оценки и взаимосвязи социальных потребностей и экономических возможностей.

По результатам анализа были выявлены дополнительные критерии, которые необходимо учитывать в процессе проработки сценариев многофункциональной адаптации промышленной архитектуры, утратившей первоначальную функцию. Это доказывает практическую целесообразность в использовании математического и информационного моделирования, которые позволяют исключить экспериментальные методы в натуре и ускорить процессы принятия решений по адаптации промышленной архитектуры в современных условиях.

Ключевые слова: повторная адаптация промышленной архитектуры, рефункционализация, математический метод, информационное моделирование, метод многокритериального принятия решений (MCDM), BIM-моделирование.

Введение. В наше время любая проектная деятельность неразрывно связана с такими понятиями как прогнозирование, моделирование, конструирование и другими. Когда речь идет о разработке каких-либо архитектурных форм или градостроительных структур, нам уже сложно представить современное проектирование без различных информационных вычислений и математических моделей-прогнозов. Основополагающее значение в этом процессе выполняет предварительное построение модели предполагаемого объекта, которая учитывает, как конкретные существующие условия застройки, так и потребности заказчика. Это способствует увеличению скорости просчета вариантов каких-либо параметров, созданию чертежей при комбинировании типовых элементов в нормативном проектировании. Развитие новых возможностей моделирования, основанных на математических вычислениях, а также стремительный рост количества различных способов компьютерного проектирования, позволяют архитектору производить точные расчеты, своевременно вносить корректировки в процессе работы и, как итог, создавать

наиболее концептуальную модель проектируемого объекта.

Построение различных видов математического и информационного моделирования позволяет также упростить процесс принятия решений при выборе функционального назначения объектов, пригодных для повторной адаптации. Среди проблем устойчивого развития городов значительное место занимают вопросы, связанные с поиском решений перепрофилирования зданий и сооружений, утративших первоначальную функцию. Актуальность данного вопроса подтверждается наличием большого количества различных подходов и методов прогнозирования, определяющих наиболее оптимальное функциональное назначение в контексте выбранного объекта повторной адаптации.

Исследования отечественных и зарубежных ученых, связанные с адаптацией промышленной архитектуры к новым функциям [1–13], посвящены анализу и поискам способов решения различных проблем, а также перспективных подходов в формировании современных принципов перепрофилирования. Так, в работах Бессарабовой Я.И., Евтушенко-Мулукаевой Н.М. [1], Карасева

Р.О., Денисенко Е.В. [2], Лёшиной К.С., Сысоевой Е.А., Сластенина П.В. [3], Толпинской Т.П., Альземеневой Е.В., Мамаевой Ю.В. [4], Цепиловой О.П. [5] и Plevoets B., Sowińska-Heim J. [6], Langston C., Shen L.-Y. [7], Oppio A., Bottero M., Ferretti V. [8] и других [9-13], среди проблем, влияющих в разной степени на объекты повторной адаптации, выделяют такие, как: значение градостроительных факторов; экологическое состояние; статус сохранности объектов; социокультурные потребности и экономические ограничения. Среди методов выделяются такие, как: концепция гибкости к подходам адаптации; применение принципов дизайна интерьеров в целях сохранения важности культурного наследия, как невозобновляемого ресурса; учет социальных и экологических изменений в результате построения системы возрождения характера и духа места и другие. Все больше ученых и архитекторов разных стран мира обращаются к использованию различных математических методов и моделей [14-35]. Прогнозирование таких типов существенно повышают уровень структурированности предлагаемых разработок и их пригодность в контексте повторного использования еще на этапе проектирования. Так в отечественной практике встречается разработка механизма функциональной архитектуры системы (ФАС), предложенная Супранович В.М. [14], которая позволяет представить вариативность синтеза объекта и функции с позиции удовлетворения запроса потребителей на основе нормативно-правовой и рабочей базы. В зарубежных исследованиях встречаются такие подходы, как создание метода оценки и предложения адаптивных стратегий на основе теории сложных адаптивных систем (CAS), используемые в работе Wang G., Liu S. [15], применение различных интеграций нечеткого метода (Fuzzy Method) в разработках Tan Y., Shen L.-Y., Langston C. [16], Vardopoulos I. [17] и других [18, 19], а также различные модификации и варианты усовершенствования метода многокритериального принятия решений (MCDM) в исследованиях Morkunaite Z., Kalibatas D., Kalibatiene D. [20], Ronzino P., Toth A., Falcidieno B. [21], De Medici S., Pinto M.R., Senia C., Fabbriatti K., De Toro P. [22] и других [23-34], которые, в зависимости от целей построения данной модели и экспертных оценок, позволяют оценить вариативность выбора функции. В своей работе Pavlovskis M., Migilinskas D., Antucheviciene J., Kutut V. [35] дополняют метод многокритериального принятия решений (MCDM), а также используют BIM-проектирование для определения наиболее подходящей функции повторной адаптации памятника архитектуры с учетом значимости его статуса, как объекта культурного наследия.

Определяющее значение в выборе нового функционального назначения играют факторы, которые зависят от конкретных требований и поставленных задач перед проектировщиком, что, в свою очередь, ограничивает универсальность выработанных моделей. В связи с этим, целью данного исследования является поиск наиболее оптимального подхода, который будет отвечать социально-экономическим потребностям и позволит учитывать типологические особенности и индивидуальные характеристики объекта при повторной адаптации. В задачи исследования входит рассмотрение и анализ существующих теоретической и практической базы по данному направлению, а также выявление методической основы, которая в дальнейшем послужит отправной точкой для построения математической модели, способствующей формированию универсального способа при определении возможностей многофункционального назначения промышленной архитектуры.

Методологический подход. В основу работы лег комплексный подход к изучению вариативности математических методов и информационного моделирования при повторной адаптации индустриальной архитектуры. На основе проведенного структурного анализа мирового и отечественного опыта были выявлены наиболее актуальные способы определения новых функциональных возможностей в процессе рефункционализации промышленных зданий, вышедших из употребления и объектов культурного наследия.

Основная часть. В современной практике проектирования, строительства и эксплуатации архитектурных объектов произошли существенные изменения. Меняются требования не только к художественному облику архитектурного объекта, но и к темпам строительства, конструктивным элементам, условиям надежности и долговечности (рис. 1). Понятие «модели» стало одним из составляющих элементов современного проектирования. Каждый этап предпроектного или строительного процесса сопровождается наличием модели [35]: математической, механической, физической и других. Использование таких моделей влияет не только на промежуточные, но и на конечные результаты проектирования, а также может во многом упростить и ускорить определенные этапы строительства. Необходимо помнить, что поток поступающей информации не прекращается как во время разработки проектного предложения, так и в процессе эксплуатации объекта и его взаимодействия с окружающей средой.

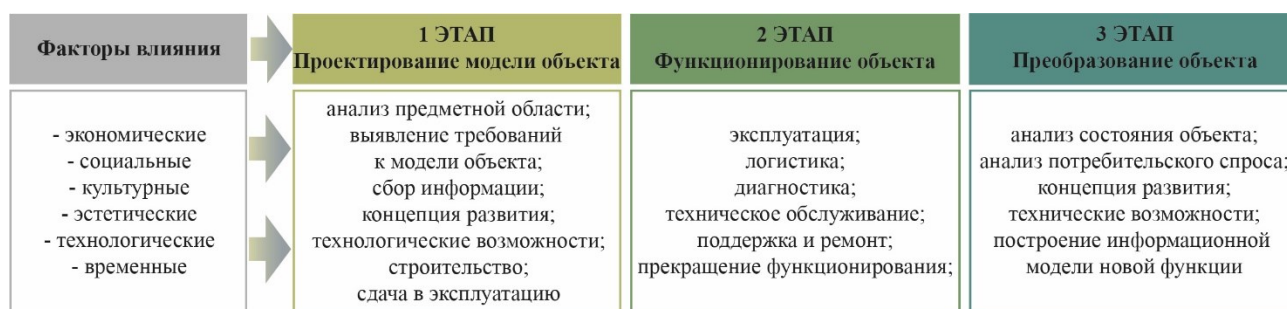


Рис. 1. Взаимосвязь факторов влияния и поэтапного анализа жизненного цикла здания

Этап моделирования подразумевает под собой построение и изучение модели потенциальных или реально существующих объектов, а также прогнозирование явлений, связанных с их жизненным циклом [36]. В процессе моделирования задействованы 3 элемента: субъект, то есть исследователь, объект исследования и модель, которая определяет или отражает взаимоотношение субъекта и объекта. Способ построения модели позволяет понять не только, как устроена структура объекта и его основные свойства, внутренние связи, законы развития, динамику изменения во времени, этапы взаимодействия с окружающим миром, но и определить наиболее подходящие методы прогнозирования последствий влияния различных форм воздействия на объект и способы реализации этих процессов. Построение математической модели помогает описать наиболее значимые связи между объектами, предсказать поведение объекта в различных условиях, оценить параметры зависимостей, спрогнозировать возможные негативные последствия, а затем определить наиболее подходящее решение для дальнейшей эксплуатации [37]. В данном случае методология математического моделирования является интеллектуальным ядром информационных технологий [38]. Развитие научно-технического прогресса требует учитывать различные технические, конструктивно-планировочные, социальные и экономические факторы на протяжении всех жизненных циклов проектирования. Информационно-математическое моделирование объединяет всю необходимую информацию, которая составляет определенную концептуальную модель исследуемого объекта, а также обработку, организацию и структуризацию полученных данных. Алгоритм преобразования этих данных позволяет сформировать математическую модель объекта, ее визуализацию и выполнить геометрические построения и преобразования [39]. Именно на этапе архитектурного проектирования закладываются основные качественные, то есть функциональные и пространственные характеристики здания как среды обитания, которая, в свою очередь, отражает основ-

ные периоды развития общества. Схема реальных и потенциальных возможностей объекта соединяется в сквозной транзитивной типологии [40], которая характеризует жизнеспособность и устойчивое развитие архитектурного объекта во времени.

Определение соответствующего механизма проектирования актуально и при решении задач, характерных для повторного использования объектов (рис. 2), утративших свою первоначальную функцию. Грамотное прогнозирование на стадии предпроектного анализа и определение успешного функционального назначения объекта [14] раскрывает перед архитектором возможность успешной реализации своих проектных предложений в будущем. Процесс информационно-математического моделирования позволяет определить системный подход к анализу и исследованию структуры изучаемого объекта, взаимосвязей его функциональных зависимостей и количественных показателей. Это дает возможность выявить базовые свойства и характеристики объекта и способствует разработке основных методов решения поставленных задач с точки зрения определенной проблематики. «Объекты промышленного наследия, которые устарели и не используются, все чаще воспринимаются как ресурс, который станет основой для развития общественной и культурной жизни в будущем» [5].

На сегодняшний день рефункционализация промышленной архитектуры не теряет своей значимости и продолжает подтверждать актуальность грамотного повторного использования таких объектов [6–11]. Тема устойчивого развития считается одной из главных проблем городских и региональных исследований. Повторное использование утративших первоначальную функцию зданий, является практическим решением для устойчивого развития городов. В связи с этим возрастает актуальность поиска возможных путей автоматизации процессов рефункционализации архитектурных объектов, которые ведут к сокращению трудоемкости этого процесса и способствуют разработке наиболее оптимальных методов определения новой функции для данных условий [41].



Рис. 2. Цикл повторной адаптации индустриальной архитектуры

Моделирование объектов на различных стадиях проектирования предполагает определение закономерностей, свойственных цикличности жизни здания, и способствует формированию обоснованных суждений о возможных состояниях и перспективах развития того или иного сценария в будущем. Одной из центральных задач таких исследований является получение оптимальных методов и решений для разработки наиболее эффективного функционального назначения, а также обеспечение наиболее подходящих эксплуатационных условий бывших индустриальных объектов. В соответствии с принципами целостности [14], разработка математической модели рефункционализации промышленной архитектуры, основанной на применении современных принципов архитектурного проектирования и математических методов, позволяет в дальнейшем решить художественные, технологические, социальные и экономические проблемы для обеспечения эффективного развития как отдельно изучаемого объекта, так и влияние его развития на структуру города в целом. В результате исследования данной модели с применением различных математических методов, численной обработки данных и информационных вычислений, основываясь на идентичности трактовки этой модели в реальных условиях, мы получаем реализуемый сценарий взаимодействия с объектом на практике [42].

В процессе современного устойчивого развития социальных и экономических условий, направленных на удовлетворение человеческих потребностей, а также последствий пренебрежительного отношения к окружающей среде и деградации некоторых архитектурных объектов, их повторное использование приобретает значительную роль. Проекты рефункционализации выступают своеобразным связующим звеном обновления городской структуры за счет объединения старого и нового поколений, восстанавливая культурные, социальные и экономические ценности. Если раньше выбор функционального назначения в большей степени определялся на основе предпочтений городских властей и инвесторов, то сейчас большое внимание уделяется социальным потребностям и мнению общества в данном

вопросе. Потенциал устойчивого развития в результате адаптации бывшей промышленной архитектуры к новой функции является одним из предметов различных исследований, например, таких как анализ решений по множеству атрибутов [27], использование нечеткой адаптивной модели выбора повторного использования [16] и процесса аналитической иерархии (АИР) [20], обращение к корреляции Ранка-Спирмена [34], употребление нечеткого метода Дельфи [28] и других. С учетом нескольких задействованных переменных повторное использование выступает основным фактором эксплуатации существующих городских ресурсов, что влияет на повышение значимости таких объектов с экономической, экологической и социальной сторон и приводит к разработке различных стратегических альтернатив и сценариев развития. В этой статье рассмотрены наиболее интересные решения применения математического моделирования в практике зарубежного и отечественного проектирования, такие как нечеткий метод DEMATEL, усовершенствованная проработка метода многокритериального принятия решений (MCDM) – PROMETHEE, интеграция грубого взвешивания оценки суммарного произведения (WASPAS) и BIM-моделирования, а также применение разработанного механизма функциональной архитектуры системы (ФАС) для адаптации промышленной архитектуры.

В работе «*Критические факторы устойчивого развития в адаптивном повторном использовании городских промышленных зданий. Нечеткий подход DEMATEL*» [17] автор рассматривает преобразование пивоварни FIX (г. Афины, Греция) в Греческий национальный музей современного искусства. В своем исследовании, основываясь на применении нечеткого метода DEMATEL (Fuzzy DEMATEL) для анализа критически важных факторов и выделения среди них групп, образованных в соответствии с причинно-следственными связями, автор определяет причины, влияющие на устойчивое развитие города анализируя проекты адаптивного использования промышленной архитектуры к новым функциям, а также оценивает уровень взаимо-

действия между ними, что в конечном итоге станет инструментом для принятия оптимальных решений в будущем. Проекты повторного использования позволяют увеличить стоимость активов наследия, превращая их в туристические ресурсы, которые могут способствовать устойчивому развитию городов не только с экономической, но и с экологической, социальной и культурной точек зрения [17]. Так же это позволяет продлить жизненный цикл здания, ресурсов и материалов за счет интеграции существующих структурных элементов и при этом сохранить значимость культурного наследия индустриального здания. В своей работе автор рассматривает факторы, влияющие на местное устойчивое развитие, такие как изменение экономики, воздействие на общество, городская среда и различные культурные аспекты. В результате детального изучения каждого из них были выявлены основные параметры, определяющие их значение при повторной адаптации промышленной архитектуры.

Предложенный методологический подход включает в себя пошаговую разработку переменных оценки, сбор оценочного мнения экспертов на основе нечеткого метода DEMATEL (Fuzzy DEMATEL), проведение расчетов, определение нормированной нечеткой матрицы, построение нечеткой матрицы полной корреляции и извлечение значений. В результате работы факторы устойчивого развития при адаптации городских промышленных зданий были разделены на две категории: факторы-причины (положительные) и факторы-следствия (отрицательные) [17].

На примере адаптации пивоварни FIX, согласно систематическому исследованию, факторы-причины считаются наиболее фундаментальными, инициативными и стабильными, оказывающими влияние на всю систему. По этому принципу были выделены наиболее важные причины повторного использования промышленной архитектуры, которые включают в себя сохранение земель на фоне разрастания городов и защиту культурного наследия. Однако, как указывает сам автор, «могут иметь место особые исключительные случаи, когда факторы-следствия вносят значительный вклад во всю систему» [17]. Таким образом, экономические показатели выступили на первое место.

Данная работа показала, что использование нечеткого метода DEMATEL (Fuzzy DEMATEL) может быть недостаточно для определения рефункционализации бывшей промышленной архитектуры. Для этого подхода большое значение играет профессиональный опыт и образование экспертов, так как их оценка имеет определен-

ный вес. С этой точки зрения, необходимо провести не однозначное определение набора переменных для важности критериев оценки экспертов. При этом, чтобы избежать ненужного дублирования факторов в системе индексов, а также преобразовать точность исследования, необходимо сначала применить систему анализа глубинных интервью экспертов. И, наконец, как утверждает сам автор, для подтверждения полученных результатов следует рассмотреть несколько более репрезентативных примеров адаптации промышленной архитектуры к новой функции.

Более глубокая и усовершенствованная проработка метода многокритериального принятия решений (MCDM) представлена в статье *«Рейтинг адаптивных стратегий повторного использования заброшенного промышленного наследия в уязвимых контекстах: многокритериальный подход к принятию решений»* [24]. В контексте рефункционализации объектов культурного наследия многокритериальные подходы обеспечивают надлежащую теоретическую и методологическую основу для решения сложных задач, которые характеризуют эти стратегии. Оценка адаптивности повторного использования представляет собой всеобъемлющий многоцелевой процесс, который объединяет не только сохранение исторических, эстетических, научных и экономических ценностей, но и включает в себя среднесрочные и долгосрочные концепции развития в сочетании с планировочными стратегиями.

Для определения и реализации наиболее подходящих стратегий повторного использования бывших заводов, ученые предложили новое применение метода Организации ранжирования предпочтений для обогащения оценок (PROMETHEE – семейство методов опережения [24], основанных на попарном сравнении выбранных объектов, а также, учитывающих условия уязвимости и оценки относительных материальных и нематериальных эффектов). Предложенный метод базируется на ряде допущений, например, таких как конечность набора критериев, не имеющих иерархической структуры и не взаимодействующих друг с другом, а также точное определение параметров модели принятия решений. Попарные сравнения обеспечивают локальные оценки, которые затем объединяются в глобальные [24]. Разработка актуальных сценариев рефункционализации заброшенного промышленного наследия основывается на примере девяти различных зданий – шерстяных и шелковых фабрик 18 века, расположенных в промышленном районе на северо-западе Италии. Предложенный метод широко применяется в процессе многокритериального анализа решений (MCDA)

[39, 40]. Это позволяет рассмотреть множество конфликтующих факторов, возникающих при определении возможных вариантов.

Цель исследования заключается в том, чтобы выявить максимально подходящее здание, из девяти предложенных, для размещения одной из семи новых функций. Выбор был сформирован на анализе бывших заводов, расположенных в одном районе, и включал в себя такие параметры как аутентичность объекта и отсутствие какой-либо действующего производства, что позволяет вводить новые функции и направления. Определение возможных вариантов адаптации основано на соответствии рассматриваемых объектов конкретным назначениям и не учитывает дополнительных вариаций, что ограничивает потенциал их дальнейшего развития. Каждый из сценариев принятия решения для этих объектов был ранжирован по 15 критериям, от наиболее к наименее подходящим для использования в соответствующем случае. Предложенные варианты были подвергнуты экспертной оценке, представленной различными группами заинтересованных сторон [41, 42], в которую вошли инвесторы, предприниматели и практики в области туризма, недвижимости и культурного наследия. Каждый эксперт, в свою очередь, мог определить наиболее подходящее здание для преобразования в соответствии с конкретным сценарием, что позволило присвоить веса различным критериям, включенным в модель оценки. Специфика рынка недвижимости в исследуемом районе продиктовала более высокий вес экспертных оценок, ориентированных на коммерческое функциональное назначение. Это отражает более широкие возможности для организации государственно-частного партнерства, привлечения частных спонсоров и предоставления финансовых ресурсов [24], необходимых для дальнейшего инвестирования рефункционализации промышленной архитектуры в данном районе.

Несмотря на то, что критерии достаточно обширны и охватывают многие стороны, включая качество окружающей среды, элементы инфраструктуры и архитектурные особенности, их определение базируется только на основе характеристик предложенных вариантов повторного использования, учитывающих аспекты рассматриваемой проблемы каждого сценария. Жесткое ограничение целевого определения эксплуатации здания не предполагает возможности многофункционального назначения, что в свою очередь, не всегда может удовлетворить социальным потребностям населения. Стоит отметить, что вариативность выбора конкретных промышленных объектов и выбор новой функции для

каждого здания также зависит от группы экспертов, которые играли определяющую роль. Тем не менее, их взгляды были полезны для ограничения потенциальных адаптивных стратегий повторного использования набором осуществимых стратегий, которые должны быть подвергнуты более широкому процессу общественного признания действий власти [24] за счет предполагаемого участия местных сообществ.

Использование современных технологий и информационного моделирования могут повысить приоритеты адаптации архитектурного наследия с целью достижения баланса между социально-экономическими и социокультурными аспектами как часть экономического, социального и культурного развития каждого города. Любое вмешательство, которое способствует повторному использованию зданий наследия, должна включать критерии, гарантирующие, что адаптация к новой функции не повлияет на ценности наследия и что оно будет сочетать в себе историческое сохранение и устойчивый дизайн [25].

Авторы статьи «*Рейтинг альтернатив преобразования исторических зданий с применением BIM и MCDM: пример дворца Сапегов в Вильнюсе*» [35], чтобы определить приоритеты и возможности конверсии архитектуры, в своей работе используют соединение метода многокритериального принятия решений (MCDM) и 3d-моделирования существующих зданий культурного наследия на примере дворца Сапегов, построенного в стиле барокко в 1689–1691 гг. в г. Вильнюс (Литва). Объекты культурного наследия имеют уникальную социально-экономическую и образовательную ценность. Они могут быть использованы для обеспечения устойчивого развития городов [33], а управление такими зданиями создает новые рабочие места и дополнительные экономические ресурсы. Впервые авторы применили синтез BIM-моделирования и одного из методов многокритериального принятия решений (MCDM) в 2016 г. при оценке возможных решений по реконструкции бывших промышленных зданий с упором на устойчивое развитие [33].

Применение различных технологий и программного обеспечения, таких как Autodesk Revit, Autodesk ReCap и Agisoft Photoscan, позволили создать точную текстурированную модель экстерьера и интерьера здания. Также в трехмерной модели были отображены наиболее характерные черты здания. На основе этой модели авторы сформулировали возможные варианты переустройства здания, а также определили связанные с ними критерии оценок принятия решений и их относительную значимость с помощью ме-

тода экспертного опроса. Для ранжирования альтернатив по множеству критериев они использовали грубую взвешенную оценку суммарного произведения (WASPAS- G) [35]. В процессе выбора наиболее эффективной стратегии устойчивого развития здания или городской территории в последнее время все чаще используется метод многокритериального принятия решений (MCDM) для решения теоретических и практических задач. Большое внимание в работе уделяется качественному BIM-моделированию объекта на основе полученных данных, таких как фотограмметрия, использование чертежей, строительных материалов и конструктивных деталей, описанных в архивах.

На основе предложенной системы, состоящей из 21 критерия, для оценки 3-х возможных сценариев конверсии (1- туристско- информационный центр с действующим музеем; 2 - научно-исследовательский институт; 3 - гостиница с конференц-центром) и проведения расчетов с использованием метода принятия решений по множеству критериев (Rough WASPAS) были ранжированы альтернативы возможной адаптации исторического здания. В группу экспертов вошли представители, чей опыт связан с сохранением памятников архитектурного наследия, строительством, архитектурой и инженерией. По их мнению, сохранение аутентичности здания является наиболее приоритетным для дальнейшей адаптации памятника архитектуры. И так как анализ чувствительности показал практически одинаковое значение 1 и 2 сценариев с небольшой лишь разницей, то авторы статьи предложили преобразовать дворец Сапегов в здание комбинированного назначения [35], в состав которого войдут научно-исследовательский институт, изучающий историю архитектуры, с музеем и туристическим информационным центром.

На примере данной статьи можно сделать вывод, что использование синтеза различных вариаций метода многокритериального принятия решений (MCDM) и BIM-моделирования существующих зданий культурного наследия может стать хорошей базой для многофункционального использования бывших в употреблении памятников промышленной архитектуры. Построение 3d-модели для объекта культурного наследия предоставляет новые возможности использования информации для дальнейшего перепрофилирования здания, является своеобразным «технологическим мостом» между прошлым и настоящим и позволяет анализировать объект как локально, так и в связке с современной застройкой. Это дает дополнительные возможности в процессе анализа возможных вариантов адаптации объектов культурного наследия.

Применение математических расчетов для определения наиболее подходящей новой функции для повторного использования зданий бывшей промышленной архитектуры также встречается и в отечественной практике. Для рассмотрения таких методов предлагается статья *«Информационное моделирование процесса рефункционализации объекта, как метод предпроектного исследования»* [14], в которой автор на примере большепролетных промышленных зданий осуществляет выработку алгоритма, включающего в себя как архитектурно-планировочные аспекты промышленных комплексов, так и построение модели выбора альтернатив.

Рассмотрение состава и структуры информационного облика изучаемых объектов повторной адаптации в контексте трех аспектов (функциональном, системном и техническом) позволяет воспринимать данный объект как единое целое. Изучение происходит с трех разных сторон, но в непрерывной связи друг с другом [44].

Автор разрабатывает механизм функциональной архитектуры системы (ФАС) [14], которая дает возможность представить синтез с позиции удовлетворения потребительского спроса пользователей и возможностей выбора различных вариантов состояний объекта на основе нормативно-правовой и рабочей базы. Результат построения функциональной архитектуры системы рефункционализации [14] основывается на выборе элементов системы рассматриваемого промышленного комплекса, подлежащих сохранению и выявлению зданий, которые имеют ключевое значение по ряду назначенных критериев. Наиболее подходящей моделью для определения этих критериев автор использует модель выбора по назначенным весовым коэффициентам, что способствует определению модели выбора альтернатив вариантов использования, включающей в себя массив объектов и их взаимодействий.

Изучение каждого потенциально возможного функционального назначения происходит с учетом затрат как на реконструкцию промышленных объектов, так и на дополнительные меры, обязательные для новой адаптации. В связи с этим по каждому из выбранных объектов, потенциально подходящих для рефункционализации, был построен «граф состояний, а также определены векторы возможных состояний» [14]. Для каждого вида нового функционального назначения был определен состав и значимость таких факторов, как реставрационные работы, инженерное, функциональное оборудование, общественные работы, градостроительное расположение и инфраструктура территории, а также возможности бюджета, представленные как векторы

постоянных ограничений; сформированы матрицы взвешенных коэффициентов и вектор переменных. На завершающем этапе построения процедуры решения систем линейных неравенств, которые описывают состояние выбранного объекта по каждому варианту, определяется значение целевых функций по выбранному спектру разделов проекта рефункционализации. Автор подтверждает, что «предлагаемый подход к оптимальному выбору вариантов решений предполагает реализацию основного принципа исследования операций – предварительное количественное обоснование оптимальных решений» [14].

Предложенный метод построения логико-вероятностной конструкции выработки определенных решений позволяет учитывать необходимые факторы и степень детализации процесса для перепрофилирования промышленных объектов и может быть доработан в соответствии с требованиями, например, такими, как оценка экономической эффективности предложенных вариантов нового многофункционального назначения в процессе конкретизации выбора объекта для перепрофилирования к новой функции. После проведения соответствующих расчетов появляется необходимость выбора области приемлемых решений, в пределах которых можно произвести окончательный выбор [45] наиболее эффективного проекта адаптации к новой функции промышленной архитектуры, утратившей свое первоначальное значение. Построение таких моделей предполагает определение основополагающих закономерностей, которые необходимы для дальнейшей рефункционализации архитектурных объектов.

Выводы. Современные подходы и методы для перепрофилирования архитектурных объектов под новые функции постепенно развиваются и модернизируются. Это продиктовано постоянным развитием структурированности предлагаемых разработок и использованием различных математических и информационных моделей. Изменение экономической ситуации и повышение качества жизни создают соответствующие предпосылки для развития социально-культурных аспектов и способствуют приспособлению заброшенных зданий, имеющих историческую и архитектурную ценность к потребностям местного населения, науки или бизнеса. Используя различные математические подходы, рассмотренные в данном исследовании, и применяя современное информационное моделирование, можно определить, какие методы, инструменты и технологии лучше всего подходят для того или иного этапа исследований в процессе решения соответствующих задач продления срока эксплуатации заброшенного архитектурного объекта, обеспечивая

при этом комплексный сбор данных и анализ конкретного объекта.

Существует множество методов решения многокритериальных задач, различных по степени сложности и приоритетным направлениям, типам используемых данных или по количеству лиц, вовлеченных в процесс принятия решения. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, свой алгоритм и выделяет тот или иной аспект анализируемого объекта или ситуации. Следовательно, с помощью проведения соответствующей исследовательской работы, построения структуры, методологии и метода оценки, можно определить перспективные подходы к рефункционализации промышленной архитектуры, которые содержат стандарты и рекомендации и также могут применяться к объектам, имеющим охраненный статус. Проработка методологии применения математических моделей и информационных технологий при решении различных проектных задач позволяет расширить ассортимент направлений осознанного поиска новых архитектурных форм, способствует более детальному исследованию аспектов возможного формообразования современных объемно-пространственных решений, а также дает возможность продлить жизненный цикл здания. Использование современных цифровых технологий помогает ускорить процесс принятия решений в определении степени значимости рефункционализации.

Анализируя результаты существующих исследований в различных междисциплинарных областях, в этой статье рассмотрены наиболее подходящие методы исследований с целью определения оптимальной систематической оценки для адаптации промышленных комплексов, утративших свою первоначальную функцию. Практическая полезность использования метода многокритериального принятия решений (MCDM) и его дополнений может стать отправной точкой для определения возможностей многофункционального назначения промышленной архитектуры, так как позволяет учитывать множество критериев разной направленности. При этом необходимо избегать лишнего дублирования фактов в системе индексов оценивания критериев, а также обеспечить точность исследования за счет пересмотра весов этих критериев и уточнения параметрических характеристик исходного объекта, учитывая при этом социальные потребности и инвестиционные возможности. Определение сценариев вариативности многофункционального назначения в рамках границ территории может базироваться на механизме функциональной архитектуры системы (ФАС) с дальнейшим уточнением и наложением ограничений. Исходя из типологических особенностей

определяющего объекта проектирования внедрение методов параметризации [46] и BIM-моделирования позволит структурировать факторы, влияющие на созависимость свойств и характеристик этого объекта, взаимосвязь сценариев вариативности конечного определения и возможность корректировок в процессе изменения данных параметров. Важным аспектом в выборе конечной функции перепрофилирования является баланс между социокультурными запросами потребителей и экономическими возможностями исполнителей, преобразующих объекты промышленной архитектуры, как часть политики экономического, социального и культурного развития каждого города.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессарабова Я.И., Евтушенко-Мулукаева Н.М. Архитектурная адаптация промышленного предприятия к новой функции // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 2 (28). С. 28–33.
2. Карасев Р.О., Денисенко Е.В. Реорганизация промышленных территорий и архитектурных объектов с учетом адаптивных процессов // Известия КГАСУ. 2020. № 2 (52). С. 177–186.
3. Лёшина К.С., Сысоева Е.А., Сластенин П.В. Принципы и приемы архитектурной адаптации исторических комплексов и зданий // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 1. С. 72–77. doi:10.17673/Vestnik.2018.01.13.
4. Толпинская Т.П., Альземенова Е.В., Мамаева Ю.В. Основные направления реновационного процесса в преобразовании промышленных территорий под общественные пространства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 3(29). С. 52–63.
5. Цепилова О.П. Анализ опыта повторной адаптации промышленной архитектуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 74–90. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90.
6. Plevoets B., Sowinska-Heim J. Community initiatives as a catalyst for regeneration of heritage sites: Vernacular transformation and its influence on the formal adaptive reuse practice // Cities. 2018. Vol. 78. Pp. 128–139. doi:10.1016/j.cities.2018.02.007.
7. Langston C., Shen L.-Y. Application of the adaptive reuse potential model in Hong Kong // International Journal of Strategic Property Management. 2007. №11(4). Pp. 193–207. doi:10.1080/1648715X.2007.9637569.
8. Oppio A., Bottero M., Ferretti V. Designing adaptive reuse strategies for cultural heritage with choice. Experiments // Appraisal: From Theory to Practice. Green Energy and Technology. Springer International Publishing AG. 2017. Pp. 303–315. doi: 10.1007/978-3-319-49676-4_23.
9. Della Spina L. Cultural heritage: A hybrid framework for ranking adaptive reuse strategies // Buildings. 2021. № 11(132). Pp. 1–24. doi:10.3390/buildings11030132.
10. Scolaro A.M., De Medici S. Downcycling and upcycling in rehabilitation and adaptive reuse of pre-existing buildings: Re-designing technological performances in an environmental perspective // Energies. 2021. № 14 (21). 6863. Pp. 1–23. doi:10.3390/en14216863.
11. Tu H.-M. The attractiveness of adaptive heritage reuse: a theoretical framework // Sustainability. 2020. Vol. 12, Iss. 6. Pp. 1–15. doi:10.3390/su12062372.
12. Bazazzadeh H., Nadolny A., Mehan A., Hashemi Safaei S. S. The importance of flexibility in adaptive reuse of industrial heritage: learning from Iranian cases // International Journal of Conservation Science. 2021. Vol. 12, Iss. 1. Pp. 113–128.
13. Blagojevic M.R., Tufegdizic A. The new technology era requirements and sustainable approach to industrial heritage renewal // Energy and Buildings. 2016. Vol. 115. Pp. 148–153. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.062.
14. Супранович В.М. Информационное моделирование процесса рефункционализации объекта, как метод предпроектного исследования // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-1. 1991. С. 1–8.
15. Wang G., Liu S. Adaptability evaluation of historic buildings as an approach to propose adaptive reuse strategies based on complex adaptive system theory // Journal of Cultural Heritage. 2021. № 52. Pp. 134–145. doi:10.1016/j.culher.2021.09.009.
16. Tan Y., Shen L.-Y., Langston C. A fuzzy approach for adaptive reuse selection of industrial buildings in Hong Kong // International journal of strategic property management. 2014. Vol. 18(1). Pp. 66–76. doi:10.3846/1648715X.2013.864718.
17. Vardopoulos I. Critical sustainable development factors in the adaptive reuse of urban industrial buildings. A fuzzy DEMATEL approach // Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 50. 50.101684. Pp. 1–12. doi:10.1016/j.scs.2019.101684.
18. Fedorczak-Cisak M., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B., Sladowski G., Tadeusz T. Fuzzy model for selecting a form of use alternative for a historic building to be subjected to adaptive reuse // Energies. 2020. № 13(11). 2809. Pp. 1–24. doi:10.3390/en13112809.
19. Milosevic D.M., Milosevic M.R., Simjanovic D.J. Implementation of adjusted fuzzy AHP method in the assessment for reuse of industrial buildings // Mathematics. 2020. № 8(10). 1697. Pp. 1–24. doi:10.3390/math8101697.

20. Morkunaite Z., Kalibatas D., Kalibatiene D. A bibliometric data analysis of multi-criteria decision making methods in heritage buildings // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2019. Vol. 25, Iss. 2: Pp. 76–99. doi:10.3846/jcem.2019.8315.
21. Ronzino P., Toth A., Falcidieno B. Documenting the structure and adaptive reuse of Roman amphitheatres through the CIDOC CRMba model // *Journal on Computing and Cultural Heritage*. 2022. Vol. 15, Iss. 2(36). Pp. 1–23. doi:10.1145/3485466.
22. De Medici S., Pinto M.R., Senia C., Fabbri-catti K., De Toro P. Building reuse: multi-criteria assessment for compatible design // *International journal of design sciences and technology*. 2017. Vol. 22(2). Pp. 165–193.
23. Ragheb G.A. Multi-criteria decision making of sustainable adaptive reuse of heritage buildings based on the A'WOT analysis: A case study of cordahi complex, Alexandria, Egypt // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2021. Vol. 16. № 3. Pp. 485–495. doi:10.18280/ijstdp.160309.
24. Bottero M., D'Alpaos C., Oppio A. Ranking of adaptive reuse strategies for abandoned industrial heritage in vulnerable contexts: A multiple criteria decision aiding approach // *Sustainability*. 2019. №11. 785. Pp. 1–18. doi:10.3390/su11030785.
25. Li Y., Zhao L., Huang J., Law A. Research frameworks, methodologies, and assessment methods concerning the adaptive reuse of architectural heritage: a review // *Built Heritage*. 2021. Vol. 5(6). Pp. 1–19. doi:10.1186/s43238-021-00025-x.
26. Sharifi A.A., Farahinia A.H. A theoretical framework for developing the MAU model to determine the most appropriate use for historic buildings // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021. Vol. ahead of print, Iss. ahead of print. doi:10.1108/ECAM-06-2021-0500.
27. Giuliani F., De Falco A., Landi S., Bevilacqua M.G., Santini L., Pecori S. Reusing grain silos from the 1930s in Italy. A multi-criteria decision analysis for the case of Arezzo // *Journal of Cultural Heritage*. 2018. № 29. Pp. 145–159. doi:10.1016/j.culher.2017.07.009.
28. Chen C.S., Chiu Y. H., Tsai L. Evaluating the adaptive reuse of historic buildings through multicriteria decision-making // *Habitat International*. 2018. № 81. Pp. 12–23. doi:10.1016/j.habitatint.2018.09.003.
29. Corrent S., Figueira J.R., Greco S. The SMAA-PROMETHEE method // *European Journal of Operational Research*. 2014. № 239(2). Pp. 514–522. doi:10.48550/arXiv.1302.5540.
30. Bottero M., D'Alpaos C., Oppio A. Multicriteria evaluation of urban regeneration processes: An application of PROMETHEE method in northern Italy // *Advances in Operations Research*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–12. doi:10.1155/2018/9276075
31. Dias L.C., Antunes C.H., Dantas G., De Castro N., Zamboni L. A multi-criteria approach to sort and rank policies based on Delphi qualitative assessments and ELECTRE TRI: The case of smart grids in Brazil // *Omega*. 2018. № 76. Pp. 100–111. doi:10.1016/j.omega.2017.04.004.
32. D'Alpaos C., Bragolusi P. Multicriteria prioritization of policy instruments in buildings energy retrofit // *Valori Valutazioni*. 2018. № 21. Pp. 15–26.
33. Pavlovskis M., Antucheviciene J., Migilinskas D. Application of MCDM and BIM for evaluation of asset redevelopment solutions // *Stud. Inform. Control*. 2016. № 25. Pp. 293–302. doi:10.24846/V25I3Y201603.
34. Adiwibowo R. S., Widodo P., Santosa I. Correlations between public appreciation of historical building and intention to visit heritage building reused as retail store // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. № 184. Pp. 357–364. doi:10.1016/j.sbspro.2015.05.103.
35. Pavlovskis M., Migilinskas D., Antucheviciene J., Kutut V. Ranking of heritage building conversion alternatives by applying BIM and MCDM: A case of sapieha palace in Vilnius // *Symmetry*. 2019. № 11. 973. Pp. 1–26. doi:10.3390/sym11080973.
36. Леденёв В.В., Монастырёв П.В., Куликов Г. М., Плотникова С.В. Расчетные модели для проектирования конструкций зданий // *Монография для научных и инженерно-технических работников, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей*. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. 296 с.
37. Бабич В.Н., Кремлёв А.Г. Геометрическое моделирование архитектурных форм и градостроительных структур // *Архитектон: известия вузов*. 2015. №2(50). 2.
38. Боргоякова Т.Г., Лозицкая Е.В. Математическое моделирование: определение, применимость при построении моделей образовательного процесса // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2017. Том 9, №2. 81. С. 1–8.
39. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.
40. Бабич В.Н., Кремлёв А.Г. Информационно-математическое моделирование в задачах архитектуры и градостроительства // *Архитектон: известия вузов*. 2012. №1(37). 5.
41. Гельфонд А.Л. Архитектурное проектирование общественных пространств: учебн. пос. для вузов. Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т - Н.Новгород: ННГАСУ, 2013. 265 с.
42. Применение ЭВМ и САПР при проектировании реконструкции объектов. Реконструкция промышленных предприятий. [Электронный

ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. <https://injzashita.com/primenenie-evm-i-sapr-pri-proektirovanii-rekonstrukcii-obekтов.html> (дата обращения: 02.04.2022).

43. Бабич В.Н. Геометризация форм и структур инженерно-строительных объектов и процессов // Архитектон: известия вузов. 2016. № 4(56). 2.

44. Шпак В.Ф. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ (теория и

практика, состояние и перспективы развития). СПб.: Элмор. 2005. 832 с.

45. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио. 1972. 552 с.

46. Свирневский Н.С. Параметризация геометрических моделей. Моделирование и распознавание 2D/3D образов. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://api-2d3d-cad.com/param> (дата обращения: 03.02.2022).

Информация об авторах

Цепилова Ольга Павловна, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: tsepilova.art@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, д. 4.

Поступила 09.04.2022 г.

© Цепилова О.П., 2022

Tsepilova O.P.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: tsepilova.art@gmail.com

RESEARCH OF METHODS FOR DETERMINING A FUNCTION DURING ADAPTIVE REUSE OF INDUSTRIAL COMPLEXES

Abstract. Modern conditions of growing trends in sustainable development of equilibrium changes in economic and socio-cultural ties characterize the relationship in consumer attitudes towards aesthetic, temporal, economic, social and other values. Competent forecasting which aimed at meeting consumer demand and preserving the environment reveals the variety of variability in the successful implementation of their project proposals to architects. Thus, the relevance of the reuse of buildings that have lost their original function which is a practical solution for the sustainable development of cities is increasing. This entails an increase in the need to find really possible ways to automate the processes of refunctionalization of architectural objects. In the research, various principles of mathematical and information modeling are studied based on variations of the multi-criteria decision-making method (MCDM), designing BIM modeling in the context of re-adaptation of cultural heritage objects, etc. It is found that, depending on the typology of object application, these methods require more specific elaboration, concretization of the weights of expert assessment and the relationship of social needs and economic opportunities. Based on the results of the analysis additional criteria are identified that must be taken into account in the process of developing scenarios for multifunctional adaptation of an industrial architecture that has lost its original function. This proves the practical expediency in the use of mathematical and information modeling which make it possible to exclude experimental methods in nature and speed up decision-making processes for adapting industrial architecture in modern conditions.

Keywords: adaptive reuse of industrial architecture, refunctionalization, mathematical method, information modeling, multi-criteria decision-making method (MCDM), BIM modeling.

REFERENCES

1. Bessarabova Ya.I., Evtushenko-Mulukaeva N.M. Architectural adaptation of an industrial enterprise to a new function [Arkhitekturnaya adaptatsiya promyshlennogo predpriyatiya k novoy funktsii]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea: Scientific and Technical Journal / Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering. Astrakhan: GAOU JSC VO "AGASU". 2019. No. 2 (28). Pp. 28–33. (rus)

2. Karasev R.O., Denisenko E.V. Reorganization of industrial territories and architectural objects, taking into account adaptive processes [Reorganizatsiya promyshlennykh territoriy i arkhitekturnykh ob"yektov s uchetom adaptivnykh protsessov]. News of KGASU. 2020. No. 2 (52). Pp. 177–186. (rus)

3. Lyoshina K.S., Sysoeva E.A., Slastenin P.V. Principles and methods of architectural adaptation of historical complexes and buildings [Printsipy i priyemy arkhitekturnoy adaptatsii istoricheskikh kompleksov i zdaniy]. Urban planning and architecture.

2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 72–77. doi:10.17673/Vestnik. 2018.01.13. (rus)

4. Tolpinskaya T.P., Alzemeneva E.V., Mamaeva Yu.V. The main directions of the renovation process in the transformation of industrial territories into public spaces [Osnovnyye napravleniya renovatsionnogo protsessa v preobrazovanii promyshlennykh territoriy pod obshchestvennyye prostranstva]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea. 2019. No. 3(29). Pp. 52–63. (rus)

5. Tsepilova O.P. Analysis of the experience of re-adaptation of industrial architecture [Analiz opyta povtorno adaptatsii promyshlennoy arkhitektury]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 12. Pp. 74–90. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90. (rus)

6. Plevoets B., Sowinska-Heim J. Community initiatives as a catalyst for regeneration of heritage sites: Vernacular transformation and its influence on the formal adaptive reuse practice. Cities. 2018. Vol. 78. Pp. 128–139. doi:10.1016/j.cities.2018.02.007.

7. Langston C., Shen L.-Y. Application of the adaptive reuse potential model in Hong Kong. International Journal of Strategic Property Management. 2007. No. 11(4). Pp. 193–207. doi:10.1080/1648715X.2007.9637569.

8. Oppio A., Bottero M., Ferretti V. Designing adaptive reuse strategies for cultural heritage with choice. Experiments. Appraisal: from theory to practice. Green Energy and Technology. Springer International Publishing AG. 2017. Pp. 303–315. doi:10.1007/978-3-319-49676-4_23.

9. Della Spina L. Cultural heritage: A hybrid framework for ranking adaptive reuse strategies. Buildings. 2021. No. 11(132). Pp. 1–24. doi:10.3390/buildings11030132.

10. Scolaro A.M., De Medici S. Downcycling and upcycling in rehabilitation and adaptive reuse of pre-existing buildings: Re-designing technological performances in an environmental perspective. Energies. 2021. No. 14 (21). 6863. Pp. 1–23. doi:10.3390/en14216863.

11. Tu H.-M. The attractiveness of adaptive heritage reuse: a theoretical framework. Sustainability. 2020. Vol. 12, Iss. 6. Pp. 1–15. doi:10.3390/su12062372.

12. Bazazzadeh H., Nadolny A., Mehan A., Hashemi Safaei S. S. The importance of flexibility in adaptive reuse of industrial heritage: learning from Iranian cases. International Journal of Conservation Science. 2021. Vol. 12, Iss. 1. Pp. 113–128.

13. Blagojevic M.R., Tufegdizic A. The new technology era requirements and sustainable approach to industrial heritage renewal. Energy and

Buildings. 2016. Vol. 115. Pp. 148–153. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.062.

14. Supranovich V.M. Information modeling of the object refunctionalization process as a method of pre-project research [Informatsionnoye modelirovaniye protsessa refunktsionalizatsii ob"yektov, kak metod predproyektного issledovaniya]. Modern problems of science and education. 2015. No. 1-1. 1991. Pp. 1–8. (rus)

15. Wang G., Liu S. Adaptability evaluation of historic buildings as an approach to propose adaptive reuse strategies based on complex adaptive system theory. Journal of Cultural Heritage, 2021. No. 52. Pp. 134–145. doi:10.1016/j.culher.2021.09.009.

16. Tan Y., Shen L.-Y., Langston C. A fuzzy approach for adaptive reuse selection of industrial buildings in Hong Kong. International journal of strategic property management. 2014. Vol. 18(1). Pp. 66–76. doi:10.3846/1648715X.2013.864718.

17. Vardopoulos I. Critical sustainable development factors in the adaptive reuse of urban industrial buildings. A fuzzy DEMATEL approach. Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 50. 50.101684. Pp. 1–12. doi:10.1016/j.scs.2019.101684.

18. Fedorczak-Cisak M., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Radziszewska-Zielina E., Szewczyk B., Sladowski G., Tadeusz T. Fuzzy model for selecting a form of use alternative for a historic building to be subjected to adaptive reuse. Energies. 2020. No. 13(11). 2809. Pp. 1–24. doi:10.3390/en13112809.

19. Milosevic D.M., Milosevic M.R., Simjanovic D.J. Implementation of adjusted fuzzy AHP method in the assessment for reuse of industrial buildings. Mathematics. 2020. No. 8(10). 1697. Pp. 1–24. doi:10.3390/math8101697.

20. Morkunaite Z., Kalibatas D., Kalibatiene D. A bibliometric data analysis of multi-criteria decision making methods in heritage buildings. Journal of Civil Engineering and Management. 2019. Vol. 25, Iss. 2: Pp. 76–99. doi:10.3846/jcem.2019.8315.

21. Ronzino P., Toth A., Falcidieno B. Documenting the structure and adaptive reuse of Roman amphitheatres through the CIDOC CRMba model. Journal on Computing and Cultural Heritage. 2022. Vol. 15, Iss. 2(36). Pp. 1–23. doi:10.1145/3485466.

22. De Medici S., Pinto M.R., Senia C., Fabbri-catti K., De Toro P. Building reuse: multi-criteria assessment for compatible design. International journal of design sciences and technology. 2017. Vol. 22(2). Pp. 165–193.

23. Ragheb G.A. Multi-criteria decision making of sustainable adaptive reuse of heritage buildings based on the A'WOT analysis: A case study of cordahi complex, Alexandria, Egypt. International Journal of Sustainable Development and Planning. 2021. Vol. 16, No. 3. Pp. 485–495.

doi:10.18280/ijdsdp.160309.

24. Bottero M., D'Alpaos C., Oppio A. Ranking of adaptive reuse strategies for abandoned industrial heritage in vulnerable contexts: A multiple criteria decision aiding approach. *Sustainability*. 2019. No 11. 785. Pp. 1–18. doi:10.3390/su11030785.

25. Li Y., Zhao L., Huang J., Law A. Research frameworks, methodologies, and assessment methods concerning the adaptive reuse of architectural heritage: a review. *Built Heritage*. 2021. Vol. 5(6). Pp. 1–19. doi:10.1186/s43238-021-00025-x.

26. Sharifi A.A., Farahinia A.H. A theoretical framework for developing the MAU model to determine the most appropriate use for historic buildings. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021. Vol. ahead of print, Iss. ahead of print. doi:10.1108/ECAM-06-2021-0500.

27. Giuliani F., De Falco A., Landi S., Bevilacqua M.G., Santini L., Pecori S. Reusing grain silos from the 1930s in Italy. A multi-criteria decision analysis for the case of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage*. 2018. No 29. Pp. 145–159. doi:10.1016/j.culher.2017.07.009.

28. Chen C.S., Chiu Y.H., Tsai L. Evaluating the adaptive reuse of historic buildings through multicriteria decision-making. *Habitat International*. 2018. No 81. Pp. 12–23. doi:10.1016/j.habitatint.2018.09.003.

29. Corrent S., Figueira J.R., Greco S. The SMAA-PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*. 2014. No 239(2). Pp. 514–522. doi:10.48550/arXiv.1302.5540.

30. Bottero M., D'Alpaos C., Oppio A. Multicriteria evaluation of urban regeneration processes: An application of PROMETHEE method in northern Italy. *Advances in Operations Research*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–12. doi:10.1155/2018/9276075.

31. Dias L.C., Antunes C.H., Dantas G., De Castro N., Zamboni L. A multi-criteria approach to sort and rank policies based on Delphi qualitative assessments and ELECTRE TRI: The case of smart grids in Brazil. *Omega*. 2018. No 76. Pp. 100–111. doi:10.1016/j.omega.2017.04.004.

32. D'Alpaos C., Bragolusi P. Multicriteria prioritization of policy instruments in buildings energy retrofit. *Valori Valutazioni*. 2018. No 21. Pp. 15–26.

33. Pavlovskis M., Antucheviciene J., Migilinskas D. Application of MCDM and BIM for evaluation of asset redevelopment solutions. *Stud. Inform. Control*. 2016. No 25. Pp. 293–302. doi:10.24846/V25I3Y201603.

34. Adiwiwono R.S., Widodo P., Santosa I. Correlations between public appreciation of historical building and intention to visit heritage building reused as retail store. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. No 184. Pp. 357–364. doi:10.1016/j.sbspro.2015.05.103.

35. Pavlovskis M., Migilinskas D., Antucheviciene J., Kutut V. Ranking of heritage building conversion alternatives by applying BIM and MCDM: A case of sapieha palace in Vilnius. *Symmetry*. 2019. No 11. 973. Pp. 1–26. doi:10.3390/sym11080973.

36. Ledenev V.V., Monastirev P.V., Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Calculation models for the design of building structures [Raschetnyye modeli dlya proyektirovaniya konstruktsiy zdaniy]. Monograph for scientific and engineering workers, graduate students, undergraduates and students of construction specialties. Tambov: Publishing House of FGBOU VO "TSTU", 2016. 296 p. (rus)

37. Babich V.N., Kremlev A.G. Geometric modeling of architectural forms and urban structures [Geometricheskoye modelirovaniye arkhitekturnykh form i gradostroitel'nykh struktur]. *Architecton: University news*. 2015. No. 2 (50). 2. (rus)

38. Borgoyakova T.G., Lozitskaya E.V. Mathematical modeling: definition, applicability in building models of the educational process [Matematicheskoye modelirovaniye: opredeleniye, primenyayemost' pri postroyenii modeley obrazovatel'nogo protsessa]. *Internet journal "Science"*. 2017. Vol. 9, No. 2. 81. Pp. 1–8. (rus)

39. Zvonarev S.V. Fundamentals of mathematical modeling: a tutorial [Osnovy matematicheskogo modelirovaniya]. Yekaterinburg: Ural Publishing House. University. 2019. 112 p. (rus)

40. Babich V.N., Kremlev A.G. Information-mathematical modeling in the problems of architecture and urban planning [Informatsionno-matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh arkhitektury i gradostroitel'stva]. *Architecton: University News*. 2012. No. 1 (37). 5. (rus)

41. Gelfond A.L. Architectural design of public spaces: textbook for universities [Arkhitekturnoye proyektirovaniye obshchestvennykh prostranstv]. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering - N. Novgorod: NNGASU. 2013. 265 p. (rus)

42. The use of computers and CAD in the design of the reconstruction of objects. Reconstruction of industrial enterprises [Primeneniye EVM i SAPR pri proyektirovanii rekonstruktsii ob'yektov. Rekonstruktsiya promyshlennykh predpriyatiy]. Adobe Acrobat Reader. <https://injzashita.com/primeneniyevm-i-sapr-pri-proektirovanii-rekonstrukcii-obektov.html> (date of access: 04.02.2022). (rus)

43. Babich V.N. Geometrization of forms and structures of engineering and construction objects and processes [Geometrizatsiya form i struktur inzhenerno-stroitel'nykh ob'yektov i protsessov]. *Architecton: university news*. 2016. No. 4 (56). 2. (rus)

44. Shpak V.F. Information technologies in the command and control system of the Navy (theory

and practice, state and development prospects) [Informatsionnyye tekhnologii v sisteme upravleniya silami VMF (teoriya i praktika, sostoyaniye i perspektivy razvitiya)]. St. Petersburg: Elmor. 2005. 832 p. (rus)

45. Wentzel E.S. Operations research [Issledovaniye operatsiy]. Moscow: Soviet radio. 1972. 552

p. (rus)

46. Svirnevsky N.S. Parameterization of geometric models [Parametrizatsiya geometricheskikh modeley]. Modeling and recognition of 2D/3D images. Adobe Acrobat Reader. URL: <https://api-2d3d-cad.com/param> (date of access: 03.02.2022). (rus)

Information about the authors

Tsepilova, Olga P. Postgraduate student. E-mail: tsepilova.art@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya street, 4.

Received 09.04.2022

Для цитирования:

Цепилова О.П. Исследование методов определения функции при повторной адаптации промышленных комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 63–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-63-76

For citation:

Tsepilova O.P. Research of methods for determining a function during adaptive reuse of industrial complexes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 63–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-63-76

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-77-87

¹Романенко А.А., ²Бузов А.А., ¹Чуев В.П., ¹Дороганов В.А., ³Лукин Е.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²АО «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа»»³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

*E-mail: neanas@mail.ru

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФТОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

Аннотация. В статье представлены результаты проведенного аналитического обзора литературы по стеклоиономерным (стеклополиалкенадным) цементам, которые нашли широкое применение в стоматологии. Полученная при смешивании порошка и жидкости затворения пластичная масса схватывается до образования твердого тела. Проанализирован состав порошка и жидкости затворения стеклоиономерного цемента. Основным компонентом порошка является измельченное кальциевое или стронциевое алюмофторсиликатное стекло, жидкость представляет собой водный раствор гомополимера акриловой кислоты или ее сополимера с малеиновой, итаконовой или другой ненасыщенной карбоновой кислотой. Представлена информация об области составов алюмофторсиликатного стекла, сырьевых компонентах и технологических параметрах варки. Также проведен анализ механизма отверждения данного стоматологического материала. При смешивании порошка и жидкости затворения происходит кислотно-основное взаимодействие и поперечное сшивание молекул полимерных кислот ионами, экстрагированными из стекла. Конечная микроструктура отвердевшего стеклоиономерного цемента представляет собой частично деградировавшие частицы стекла, встроенные в матрицу из полиалкеноатов кальция и алюминия и покрытые слоем силикагеля. Представленная в данном обзоре информация может быть полезна для комплексного понимания врачами-стоматологами, разработчиками стоматологических материалов и научными группами, проводящими исследования в данной предметной области, физико-химического процесса отверждения данного материала.

Ключевые слова: стеклоиономерный цемент, алюмофторсиликатное стекло, поликислота, стоматологический материал.

Введение. Стеклоиономерные цементы (СИЦ) – это материалы, состоящие из порошка и жидкости затворения. Полученная при их смешивании пластичная масса схватывается до образования твердого тела. Отверждение СИЦ происходит в результате кислотно-щелочной реакции между порошком алюмосиликатного стекла и водного раствора поликислоты. Данные материалы носят также название «стеклополиалкенадные цементы», которое происходит от терминов «стекло» и «алкены», который указывает на присутствие двойной связи между атомами углерода в молекуле органического соединения. Они были впервые описаны A.D. Wilson и B.E. Kent в 1971 году [1], а в 1975 году в США компанией «Dentsply De Trey Ltd» был выпущен первый коммерческий стеклоиономерный цемент «ASPA» (сокращение от Alumino Silicate Polyacrylic Acid).

В терапевтической стоматологии СИЦ применяются для временного и постоянного пломбирования зубов [2–4], в том числе по ART-методике (атравматическое восстановительное лечение) [5–8], в качестве изолирующей подкладки при пломбировании композитами и для obtura-

ции корневых каналов [9]. В ортопедической стоматологии при помощи данных материалов фиксируют коронки и мостовидные протезы [10], а также ортодонтические конструкции [11]. Также стеклоиономерные цементы нашли применение в детской стоматологии, их применяют для герметизации фиссур [12–14] и пломбирования молочных зубов [15].

Основная часть. Основным компонентом порошка СИЦ является тонко измельченное алюмосиликатное стекло, состав которого оказывает значительное влияние на процесс отверждения СИЦ и приемлемость его характеристик. Ранее применялись кальциевые алюмосиликатные стекла системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$, либо $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-CaF}_2$ [16], основными компонентами которых являлись оксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3) и фторид кальция (CaF_2). Состав полупрозрачного стекла, пригодного для получения СИЦ, ограничен центральной областью фазовой диаграммы (рис. 1). Содержание кварца (диоксида кремния) в количестве более 40 % обеспечивает прозрачность стекла, но замедляет процесс схватывания СИЦ и снижает его прочность после отверждения. Значительное количество оксида алюминия

(Al_2O_3), напротив, придает материалу непрозрачность, но снижает сроки схватывания СИЦ, повышает его прочность и кислотоустойчивость. Соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ характеризует реакцию схватывания СИЦ: реакция начинается, если соотношение алюминия и кремния составляет более чем 2/1. При повышении содержания CaF_2 увеличивается количество фтора, что придает материалу кариесстатические свойства, но снижается его прозрачность.

Фториды натрия и алюминия, фосфаты кальция или алюминия также могут быть введены в состав стекла в небольших количествах. При введении фосфата алюминия прозрачность СИЦ снижается, но его прочность и механическая стабильность повышаются. Фториды первоначально используются в качестве флюса при производстве стекла, а затем становятся важной частью реакции схватывания [17]. В качестве флюса для снижения температуры плавления применяется также Na_3AlF_6 .

Фтор является важным компонентом стекла, он снижает температуру плавления, улучшает манипуляционные характеристики свежешаманного цементного теста, предотвращает преждевременное гелеобразование и улучшает прочность цемента после отверждения. Потери фтора при варке, связанные с образованием летучих HF и SiF_4 , приводят к изменениям элементного состава стекла и в травлению нагревательных элементов печи.

Первое стекло, применение которого позволило получить СИЦ с удовлетворительными характеристиками, называлось G200 и имело состав, представленный в табл. 1. В табл. 2 представлен более поздний состав стекла G338. [18].

Таблица 1

Состав стекла G200

Компонент	Содержание, масс. %
SiO_2	30,1
Al_2O_3	19,9
AlF_3	2,6
CaF_2	34,5
NaF	3,7
AlPO_4	10,0

Таблица 2

Состав стекла G338

Компонент	Содержание, масс. %
SiO_2	24,9
Al_2O_3	14,2
AlF_3	4,6
CaF_2	12,8
NaAlF_6	19,2
AlPO_4	24,2

Существуют преимущества в использовании стронция или лантана для замены части или всего кальция в алюмосиликатном стекле, поскольку эти элементы придают определенную степень рентгеноконтрастности. Замещение кальция на стронций в стеклах может быть достигнуто заменой CaO и CaF_2 на SrO и SrF_2 в смеси [19].



Рис. 1. Область составов стекла, применяемого для получения СИЦ [20]

Сплавление компонентов проводится при температуре 1200–1550 °С [21], по другим данным – 1100–1500 °С [3]. Расплав стекла резко охлаждают путем выливания в воду или на холодную металлическую пластину, а затем в воду. После охлаждения полученную фритту, состоящую из крупных кусков стекла, подвергают дроблению и тонкому помолу. Рекомендуется применять для измельчения воздушно-струйно-помольные установки в связи с тем, что они позволяют исключить загрязнение порошка другими веществами [22]. Для помола применяются также шаровые мельницы. Было показано, что уменьшение размера частиц повышает реакционную способность стекляного порошка и изменяет реакцию схватывания, и это может привести к повышению конечных физических свойств. Размер частиц порошка СИЦ, применяемого для пломбирования зубов, составляет до 50 мкм, а для фиксирующих и прокладочных СИЦ – менее 20–25 мкм [23].

Для снижения поверхностной активности порошка СИЦ может применяться отжиг при 400–600 °С и/или промывка раствором уксусной (концентрация 5 %) или соляной кислоты [24].

Основными ингредиентами стекла являются оксид алюминия и оксид кремния, которые образуют каркасную структуру стекла (рис. 2). Структура тетрагональная с трехмерной структурой силикатного стекла. В центре тетраэдра находится Si, а в вершинах – O. Ион алюминия может заместить ион кремния в центральном положении

тетраэдра и имеет координационное число четыре в каркасной структуре, как и ион кремния. В общей структуре необходимо соблюдение условия электронейтральности, поэтому вблизи ионов Al^{3+} располагаются ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Ионы M^{2+} (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и т.д.) также являются реакционноспособными. Они работают, как модифицирующие

ионы и уменьшают молекулярную массу силикатной структуры. Модифицирующие ионы металлов выступают причиной высокой реакционной способности стекла по отношению к поликислотам. Фторид или фосфат ионы также присутствуют в структуре стекла. Такие отрицательно заряженные ионы не включены в каркасную структуру кремниевого тетраэдра, поэтому F^- могут диффундировать из стекла [25].

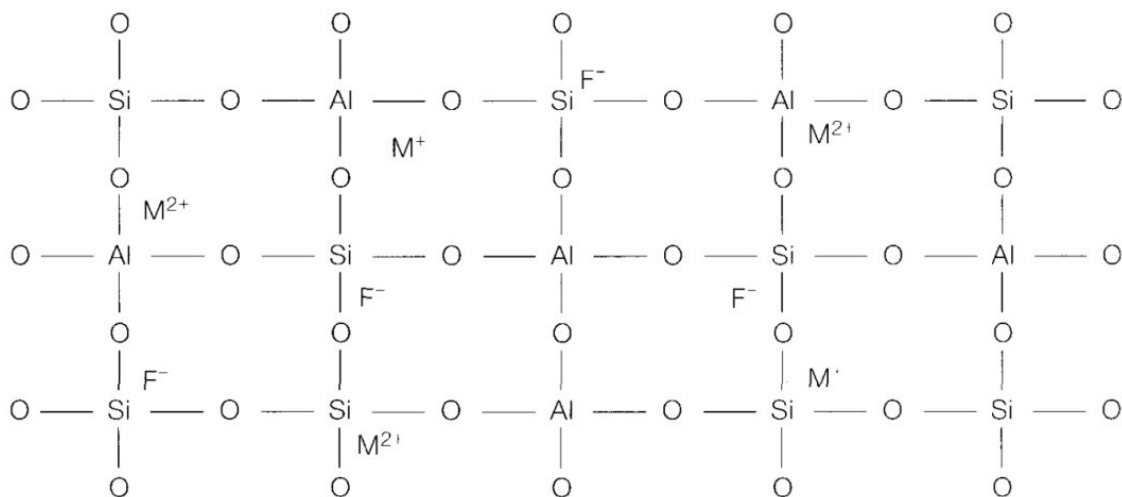


Рис. 2. Каркасная структура фторалюмосиликатного стекла [25]

В результате могут быть получены стекла различной структуры. В некоторых из них есть разделение фаз, что приводит к их непрозрачности, в то время как другие не имеют видимого фазового разделения и прозрачны. Было обнаружено, что применение стекла с фазовым разделением позволяет получить более прочный цемент (прочность при сжатии около 200 МПа), чем применение прозрачного стекла (около 130 МПа).

Цвет стеклоиономерных цемента можно изменять добавлением к порошку цветных пигментов.

Жидкость затворения СИЦ – водный раствор гомополимера акриловой кислоты или ее сополимера с итаконовой кислотой, малеиновой кислотой и другими мономерами (рис. 3) [26–27]. Ранее жидкость представляла собой 50 %-ный водный раствор полиакриловой кислоты, который был очень вязким и имел склонность к гелеобразованию, которое объясняется медленным образованием межмолекулярных водородных связей [28]. Полималеиновая и полиитаконовая кислоты содержат в два раза больше карбоксильных групп, за счет которых происходит сшивание цепочек полимера [29], чем полиакриловая, кроме того, итаконовая кислота снижает вязкость жидкости и ингибирует загустевание вследствие образования межмолекулярных водородных связей [17]. Таким образом, сополимеризация акриловой кислоты с итаконовой, малеиновой кислотой

и т.д. повышает реакционную способность жидкости, снижает вязкость и уменьшает склонность к гелеобразованию. Также было предложено применять сополимер винилфосфоновой кислоты, которая намного сильнее, чем прочие кислоты, используемые в производстве жидкости СИЦ [30–31].

Предполагалось, что максимальный молекулярный вес, который удовлетворяет клиническим требованиям, составляет около 75.000 при концентрации 45 % по массе. Впоследствии было показано, что при более высокой молекулярной массе концентрация должна быть снижена, а при более низкой молекулярной массе концентрация может быть увеличена. При превышении этих ограничений происходит резкое увеличение вязкости, что делает практически невозможным получение требуемой цементной смеси. По мере увеличения молекулярной массы жидкости увеличивается прочность СИЦ и его устойчивость к эрозии, но время схватывания и рабочее время сокращается [32–34].

Полиакриловая кислота может быть обезвожена и включена в состав порошка СИЦ [35], а жидкость в таком случае будет либо водой, либо водным раствором винной кислоты. В дегидратированной форме можно использовать полиалкеновые кислоты с более высоким молекулярным весом [24].



Рис. 3. Структурные формулы кислот, используемых в жидкости затвердения СИЦ [20]

Ранние составы СИЦ характеризовались пролонгированным временем твердения, что является недостатком для их клинического применения. Данная проблема была устранена путем введения (+)-винной кислоты в жидкость количестве 5–10 % от объема [36–38]. Она быстро реагирует с Ca^{2+} , которые высвобождаются из стекла, в результате чего образуется тартрат кальция, что позволяет удлинить рабочее время за счет предотвращения преждевременного образования цепей полиакрилата кальция. Отверждение ускоряется за счет повышения скорости образования поперечных связей алюминия с полиакрилатом [39–40]. Кроме того, (+)-винная кислота положительно влияет прочность в ранние сроки. Рассматривался вариант применения лимонной кислоты, но, в отличие от (+)-винной кислоты, она способствует повышению растворимости и, следовательно, не применима в качестве добавки в СИЦ [41].

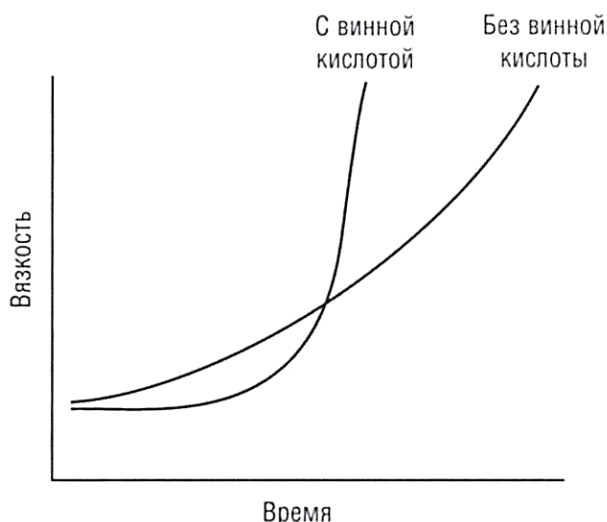


Рис. 4. Влияние винной кислоты на кривую вязкость-время при отверждении СИЦ [17]

СИЦ отверждается в три стадии: растворение, гелеобразование и отверждение [42–44].

После смешивания двух компонентов, стекло подвергается воздействию полиалкеновой кислоты. В процессе диффузии макромолекулярной цепи поликислоты в стекло происходит высвобождение протонов, которые впоследствии

принимают участие в процессах высвобождения ионов алюминия, кальция и фторида. Из зависимостей, приведенных на рисунке 5 видно различие в кинетике диффузии данных ионов. Так, прочность связи ионов кальция меньше относительно ионов алюминия, что объясняется непосредственным вхождением последних в структуру стекла. В результате процессов высвобождения ионов кальция, алюминия, натрия и фтора, под действием карбоксильных групп, образуется переходный слой геля из SiO_2 (рис. 6.).

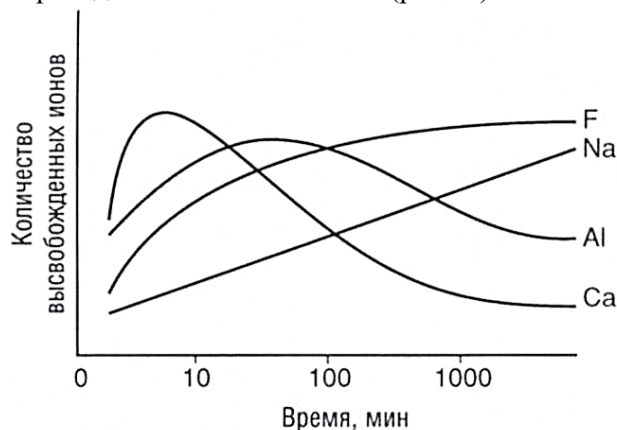
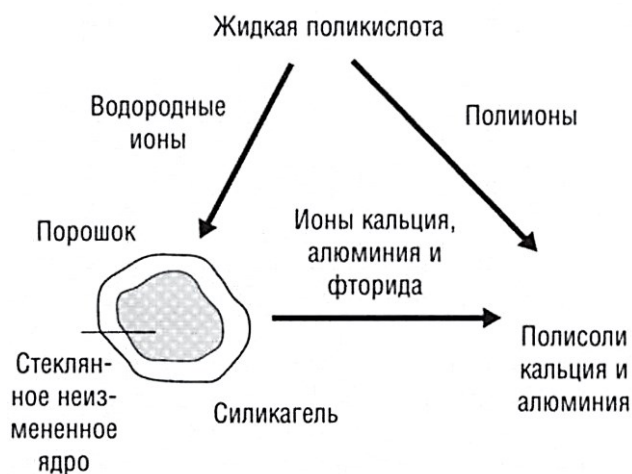
Рис. 5. Кинетика высвобождения ионов Ca^{2+} , Al^{3+} , Na^{+} и F^{-} из внешнего слоя частиц стекла [17]

Рис. 6. Процессы, протекающие на начальной стадии отверждения СИЦ [20]

Процесс диффузии ионов из внешнего слоя частиц стекла полностью завершается по истечении суток. Первичное отверждение (не достигая

финальных физико-механических характеристик), в зависимости от состава СИЦ, происходит в течение 3–6 минут. При этом для обеспечения процесса диссоциации карбоксильных групп поликислоты на начальной стадии процесса отверждения обязательным условием является присутствие воды либо в качестве растворителя в жидком компоненте, либо воды добавляемой на стадии замешивания цемента [17].

Процесс структурирования СИЦ включает в себя образование гетерогенной системы на основе полиакриловой и силикатной матриц. Источником силикатной матрицы выступает силикагель, который образуется в процессе взаимодействия карбоксильных групп поликислоты с поверхностью частиц стекла. Полиакриловая матрица образуется в результате сшивания макромолекул поликислоты катионами Ca^{2+} и Al^{3+} . Образование поперечных сшивок происходит преимущественно по донорно-акцепторному механизму, где донором выступают карбоксильные группы поликарбоновой кислоты, а акцептором – катионы металлов. При этом наибольшей сшивающей способностью обладают ионы кальция (рис. 7.).

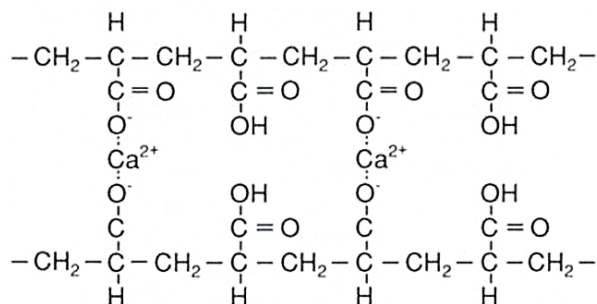


Рис. 7. Образование поперечных сшивок между макромолекулами поликислоты в фазе образования геля [20]

В процессе образования поперечных сшивок Ca^{2+} в фазе гелеобразования возможно протекание нежелательного процесса хелатирования карбоксильных групп одной макромолекулярной цепи, что является причиной снижения степени сшивания в образующейся пространственной сетке. Присутствие трехвалентных катионов Al^{3+} приводит к повышению степени поперечного сшивания и позволяет частично решить проблему, возникающую при использовании бивалентных ионов в качестве сшивающего агента (рис. 8.). Процесс сшивания макромолекул полиакриловой кислоты катионами алюминия протекает медленнее (несколько часов при 20°C), чем в случае катионов кальция. При этом достижение финальных физико-механических характеристик происходит в результате сшивания макромолекул поликислот катионами Al^{3+} . На данной стадии процесса негативный эффект оказывает присутствие избытка воды, в результате чего

происходит удаление катионов алюминия из зоны протекания реакции образования поперечных сшивок. Избыток воды частично связывается в слое силикагеля на поверхности частиц стекла.

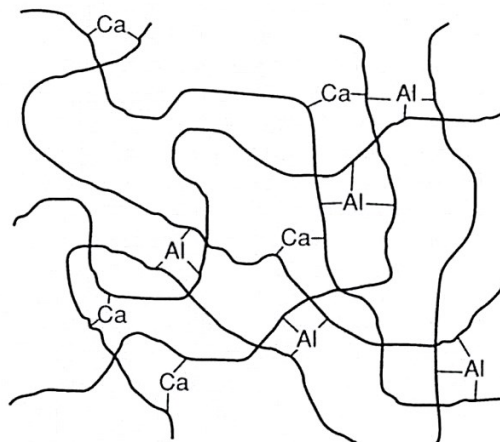


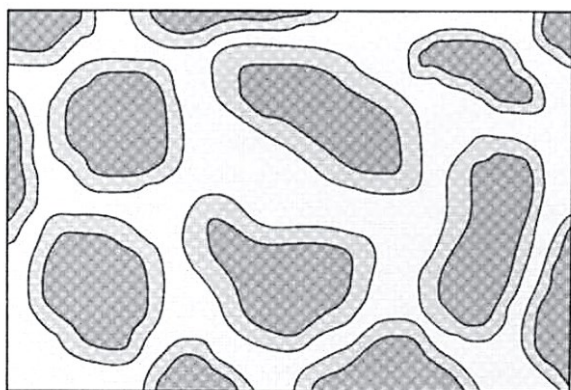
Рис. 8. Фаза окончательного отверждения СИЦ [17]

Фторид-ионы играют важную роль в процессе структурирования СИЦ и выступают в качестве регулятора pH. При отсутствии фторид-ионов в системе происходит резкое повышение pH, в результате чего цемент становится непригоден для использования. Фторид и фосфат-ионы образуют нерастворимые соли, а также комплексы, которые впоследствии принимают участие в переносе ионов и процессе взаимодействия с карбоксильными группами полиакриловой кислоты.

Фаза отверждения, следующая за фазой гелеобразования, может протекать до 7 дней и включает в себя сшивания полианионных цепей катионами металлов, высвобожденных из приповерхностного слоя частиц стекла на начальных этапах.

Конечная микроструктура отвердевшего цемента представляет собой распределенные в полиалкенадной матрице частицы стекла, которые в свою очередь покрыты слоем силикагеля (рис. 9.) [24]. По результатам исследования методом инфракрасной спектроскопии показано, что основные продукты реакции схватывания – полиакрилаты кальция и алюминия, имеющие характеристические полосы при 1540 см^{-1} и 1600 см^{-1} соответственно. Также показано, что СИЦ содержит остаточные непрореагировавшие карбоксильные группы [45]. Примерно от 11 % до 24 % затвердевшего цемента составляет вода, поэтому стеклоиономерный цемент можно назвать материалом на водной основе. Содержащаяся в СИЦ вода подразделяется на «слабосвязанную» воду, которую можно удалить из системы посредством обезвоживания (испарения), и «прочно связанную воду», которая входит в конечную структуру отвержденного СИЦ и не может быть удалена без ее разрушения. «Слабосвязанная» вода может

быть потеряна путем испарения, если цемент подвергается воздействию воздуха. С другой стороны, на ранних стадиях после смешивания может происходить дальнейшее поглощение воды из-за растворения довольно слабых полиакрилатов кальция, что ухудшает физические свойства и снижает прозрачность СИЦ [24]. На период отверждения СИЦ необходима изоляция. Показатель растворимости цемента снижается в процессе отверждения и достигает минимального значения по завершению реакции.



-  Алумосиликатное стекло
-  Силикагель
-  Поперечно-сшитая поликислота

Рис. 9. Структура отвержденного стеклоиономерного цемента [20]

В СИЦ присутствует определенная степень пористости, что неизбежно, поскольку они являются двухкомпонентными материалами, требующими смешивания. Основная опасность, связанная с пористостью в этих материалах, заключается в потере прочности на сжатие и растяжение, поскольку пустоты могут способствовать распространению трещин [24].

Выводы

В статье представлены результаты проведенного аналитического обзора литературы по стеклоиономерным (стеклополиалкенадным) цементам, которые нашли широкое применение в стоматологии. Они представляют собой материалы, состоящие из порошка и жидкости, при смешивании которых получают пластичную массу, схватывающуюся до образования твердого тела. Проанализирован состав порошка и жидкости затворения стеклоиономерного цемента. Основным компонентом порошка является измельченное кальциевое или стронциевое алюмофторсиликатное стекло, жидкость представляет собой водный раствор гомополимера акриловой кислоты или ее сополимера с итаконовой кислотой, малеиновой кислотой и другими мономерами. Представлена информация об области составов

алюмофторсиликатного стекла, сырьевых компонентов и технологических параметров варки. Также проведен анализ механизма отверждения данного стоматологического материала. При смешивании порошка и жидкости затворения происходит кислотно-основное взаимодействие и поперечное сшивание молекул полимерных кислот ионами, экстрагированными из стекла. Конечная микроструктура отвержденного стеклоиономерного цемента представляет собой частично деградировавшие частицы стекла, встроенные в матрицу из полиалкеноатов кальция и алюминия и покрытые слоем силикагеля. Представленная в данном обзоре информация может быть полезна для комплексного понимания врачами-стоматологами, разработчиками стоматологических материалов и научными группами, проводящими исследования в данной предметной области, физико-химического процесса отверждения данного материала.

Источник финансирования. Проект Пр-7/22 в рамках реализации Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021-2030 гг. «Приоритет 2030»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wilson A.D., Kent B.E. The glass-ionomer cement, a new translucent cement for dentistry // J. Appl. Chem. Biotechnol. 1971. Vol.21. № 11. Pp. 313–313. doi:10.1002/jctb.5020211101.
2. Gurgan S., Kutuk Z.B., Ergin E., Oztas S.S., Cakir F.Y. Clinical performance of a glass ionomer restorative system: a 6-year evaluation // Clin Oral Investig. 2017. Vol.21. № 7. Pp. 2335–2343. doi:10.1007/s00784-016-2028-4.
3. Manappallil J.J. Basic Dental Materials. II Edition. India: Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, 2003. 446 p. doi:10.5005/jp/books/10075.
4. Hassan M.M. Glass Ionomer Cements May Be Used as an Alternative to Composite Resins in Class II (CL II) Restoration of Primary Molars // J Evid Based Dent Pract. 2020. Vol. 20. № 2. Pp. 1–13. doi:10.1016/j.jebdp.2020.101437.
5. Frencken J.E. The ART approach using glass-ionomers in relation to global oral health care // Dental Materials. 2010. Vol.26. № 1. Pp. 1–6. doi:10.1016/j.dental.2009.08.013.
6. Torres P.J., Phan H.T., Bojorquez A.K., Garcia-Godoy F., Pinzon L.M. Minimally Invasive Techniques Used for Caries Management in Dentistry. A Review // J Clin Pediatr Dent. 2021. Vol. 45. № 4. Pp. 224–232. doi:10.17796/1053-4625-45.4.2.
7. Heintze S.D., Loguercio A.D., Hanzen T.A., Reis A., Rousson V. Clinical efficacy of resin-based direct posterior restorations and glass-ionomer resto-

rations - An updated meta-analysis of clinical outcome parameters // *Dent Mater.* 2022. Vol. 38. № 5. Pp. e109-e135. doi:10.1016/j.dental.2021.10.018.

8. Mustafa H.A., Soares A.P., Paris S., Elhenawy K., Zaslansky P. The forgotten merits of GIC restorations: a systematic review // *Clin Oral Investig.* 2020. Vol. 24. № 7. Pp. 2189–2201. doi:10.1007/s00784-020-03334-0.

9. Alirezaei M., Bagherian A., Shirazi S.A. Glass ionomer cements as fissure sealing materials: yes or no?: A systematic review and meta-analysis // *The Journal of the American Dental Association.* 2018. Vol. 149. № 7. Pp. 640-649.e9. doi:10.1016/j.adaj.2018.02.001.

10. Powers J.M., Wataha J.C. Dental materials: foundations and applications. Eleventh edition. Maryland Heights, Missouri: Mosby, 2015. 272 p.

11. Fricker J.P. Therapeutic properties of glass-ionomer cements: Their application to orthodontic treatment // *Aust Dent J.* 2022. Vol. 67. № 1. Pp. 12–20. doi:10.1111/adj.12888.

12. Weintraub J.A. The effectiveness of pit and fissure sealants // *J. Public Health Dent.* 1989. Vol. 49. № 5. Pp. 317–330. doi:10.1111/j.1752-7325.1989.tb02090.x.

13. Kervanto-Seppala S., Lavonius E., Pietila I., Pitkaniemi J., Meuman J.H., Kerosuo E. Comparing the caries-preventive effect of two fissure sealing modalities in public health care: A single application of glass ionomer and a routine resin-based sealant programme. A randomized split-mouth clinical trial // *Int. J. Paediatr. Dent.* 2008. Vol. 18. № 1. Pp. 56–61. doi:10.1111/j.1365-263X.2007.00855.x.

14. Yengopal V., Mickenautsch S., Bezerra A.C., Leal S.C. Caries-preventive effect of glass ionomer and resin-based fissure sealants on permanent teeth: A meta analysis // *J. Oral Sci.* 2009. Vol. 51. № 3. Pp. 373–382. doi:10.2334/josnusd.51.373.

15. Berg J.H., Croll T.P. Glass ionomer restorative cement systems: an update // *Pediatr Dent.* 2015. Vol. 37. № 2. Pp. 116–124.

16. Hill R.G., Wilson A.D. Some structural aspects of glasses used in ionomer cements // *Glass Technol.* 1988. Vol. 29. № 4. Pp. 150–188.

17. Биденко Н.В. Стеклоиономерные цементы в стоматологии. Киев: Книга плюс, 1999. 120 с.

18. Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. doi:10.1007/978-3-319-22626-2.

19. Shahid S., Hassan U., Billington R.W., Hill R.G., Anderson P. Glass ionomer cements: Effect of strontium substitution on esthetics, radiopacity and fluoride release // *Dent. Mater.* 2014. Vol. 30. № 3. Pp. 308–313. doi:10.1016/j.dental.2013.12.003.

20. Нурт Р. Основы стоматологического материаловедения / Ричард ван Нурт. 2-е изд. Edinburgh: Mosby. М.: КМК-Инвест, 2002. 304 с.

21. Nicholson J. W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society of Chemistry, 2020. 272 p. doi:10.1039/9781788016360.

22. Рыбакова А.И. Материаловедение в стоматологии. М.: Медицина, 1984. 424 с.

23. Трезубов В.Н., Штейнгарт М.З., Миншнев Л.М. Ортопедическая стоматология. Прикладное материаловедение: учеб. для мед. Вузов. Под ред. проф. Трезубова В.Н. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: СпецЛит, 2001. 328 с.

24. Mount G.J. An Atlas of Glass-Ionomer Cements: A Clinician's Guide. London: Martin Dunitz, 2003. 224 p.

25. Davidson C.L., Mjor I.A. Advances in Glass-Ionomer Cements. USA: Quintessence Publishing Co, 1999. 303 p.

26. Crisp S., Kent B.E., Lewis B.G., Ferner A.J., Wilson, A.D. Glass ionomer cement formulations. II. The synthesis of novel polycarboxylic acids // *J. Dent. Res.* 1980. Vol. 59. № 6. Pp. 1055–1063. doi:10.1177/00220345800590060801.

27. Crisp S., Wilson A.D. Cements comprising acrylic and itaconic acid copolymers and fluoroaluminosilicate glass powder. Patent US, no. 4016124, 1977.

28. Crisp S., Lewis B.G., Wilson A.D. Gelation of polyacrylic acid aqueous solutions and the measurement of viscosity // *Journal of Dental Research.* 1975. Vol. 54. № 6. Pp. 1173–1175. doi:10.1177/00220345750540061201.

29. Nicholson, J.W. Chemistry of glass-ionomer cements: A review // *Biomaterials.* 1998. Vol. 19. № 6. Pp. 485–494. doi:10.1016/s0142-9612(97)00128-2.

30. Ellis J., Wilson A.D. Polyphosphonate cements: A new class of dental materials // *J. Mater. Sci. Lett.* 1990. Vol. 9. Pp. 1058–1060. doi:10.1007/BF00727876.

31. Nicholson J.W. Glass-ionomer cements for clinical dentistry // *Mater. Technol.* 2010. Vol. 25. Pp. 8–13.

32. Wilson A.D., Crisp S., Abel G. Characterisation of glass-ionomer cements 4; effects of molecular weight on physical properties // *Journal of Dentistry.* 1977. Vol. 5. № 2. Pp. 117–120. doi:10.1016/0300-5712(77)90070-7.

33. Hill R.G., Wilson A.D., Warrens C.P. The influence of poly(acrylic acid) molecular weight on the fracture toughness of glass-ionomer cements // *Journal of Materials Science.* 1989. Vol. 24. Pp. 363–371. doi:10.1007/BF00660982.

34. Wilson A.D., Hill R.G., Warrens C.P., Lewis B.G. The influence of poly(acrylic acid) molecular weight on some properties of glass-ionomer cement // *Journal of Dental Research.* 1989. Vol. 68. № 2. Pp. 89–94. doi:10.1177/00220345890680021401.

35. McLean J.W., Wilson A.D., Prosser H.J. Development and use of water-hardening glass-ionomer luting cements // Journal of Prosthetic Dentistry. 1984. Vol. 52. № 2. Pp. 175–181. doi:10.1016/0022-3913(84)90091-x.

36. Khoroushi M., Mansoori-Karvandi T., Hadi S.. The effect of pre-warming and delayed irradiation on marginal integrity of a resin-modified glass-ionomer // Gen Dent. 2012. Vol. 60. № 6. Pp. e383–388.

37. Wilson A.D., Crisp S., Ferner A.J. Reaction in glass ionomer cements: IV. Effects of chelating comonomers on setting behaviors // Journal of Dental Research. 1976. Vol. 55. № 3. Pp. 489–495. doi:10.1177/00220345760550033101.

38. Crisp S., Ferner A.J., Lewis B.G., Wilson A.D. Properties of improved glass-ionomer cement formulations // Journal of Dentistry. 1975. Vol. 3. № 3. Pp. 125–130. doi:10.1016/0300-5712(75)90063-9.

39. Crisp S., Lewis B.G., Wilson A.D. Characterization of glass-ionomer cements. 5. The effect of the tartaric acid concentration in the liquid component // J. Dent. 1979. Vol. 7. № 4. Pp. 304–312. doi:10.1016/0300-5712(79)90143-x.

40. Nicholson J.W., Brookman P.J., Lacy O.M., Wilson A.D. Fourier transform infrared spectroscopic study of the role of tartaric acid in glass-ionomer dental cements // J. Dent. Res. 1988.

Vol. 67. № 12. Pp. 1451–1454. doi:10.1177/00220345880670120201.

41. Braden M., Clarke R. L., Nicholson J., Parker S. Polymeric Dental Materials. Germany: Springer. 2012. 124 p. doi:10.1007/978-3-642-60537-6

42. Crisp S., Pringuer M.A., Wardleworth D., Wilson A.D. Reactions in glass-ionomer cements: II. An infrared spectroscopic study // J. Dent. Res. 1974. Vol. 53. № 6. Pp. 1414–1419. doi:10.1177/00220345740530062001.

43. Pires R., Nunes T.G., Abrahams I., Hawkez G.E. Morais C.M. Fernandez, C. Stray-field imaging and multinuclear magnetic resonance spectroscopy studies on the setting of a commercial glass-ionomer cement // J. Mater. Sci. Mater. Med. 2004. Vol. 15. № 3. Pp. 201–208. doi:10.1023/b:jmsm.0000015479.65516.d0.

44. Zainuddin N., Karpukhina N., Hill R.G., Law R.V. A long-term study on the setting reaction of glass ionomer cements by ²⁷Al MAS-NMR spectroscopy // Dent. Mater. 2009. Vol. 25. № 3. Pp. 290–295. doi:10.1016/j.dental.2008.07.008.

45. Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. doi:10.1007/978-3-319-22626-2.

Информация об авторах

Романенко Анастасия Андреевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: neanas@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бузов Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, технический директор. E-mail: buzov@mail.ru. Опытнo-экспериментальный завод «ВладМиВа», Россия, 308023, Белгород, ул. Студенческая, д.19

Чуев Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: chuev@vladmiva.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: dva_vajik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лукин Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9.

Поступила 27.06.2022 г.

© Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Лукин Е.С. 2022

¹Romanenko A.A., ²Buzov A.A., ¹Chuev V.P., ¹Doroganov V.A., ³Lukin E.S.

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

²VladMiVa Experimental Plant JSC

³Mendeleev University of Chemical Technology

*E-mail: neanas@mail.ru

COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINOFLUOROSILICATE GLASS

Abstract. The article presents the results of an analytical review of the literature on glass ionomer (glass polyalkenate) cements, which are widely used in dentistry. These materials consist from the powder and liquid, which form a plastic mass at mix that sets to form a solid. The composition of the powder and liquid components of glass ionomer cement has been analyzed. The solid component is powdered calcium or strontium

aluminofluorosilicate glass, the liquid component is an aqueous solution of acrylic acid homopolymer or its copolymer with methylene-succinic acid, maleic acid and other monomers. Information about the range of compositions of aluminofluorosilicate glass, raw materials and melting process parameters are represented. An analysis of the curing mechanism of this dental material is also carried out. Acid-base interaction and cross-linking of polymeric acid molecules with ions extracted from glass occur at mixing the powder and liquid components. The final microstructure of the hardened glass ionomer cement is partially decomposed glass particles embedded in a matrix of calcium and aluminum polyalkenoates and coated with a layer of silica gel. The information presented in this review may be useful for a comprehensive understanding by dentists, developers of dental materials and scientific groups conducting research in this subject area of the physicochemical process of curing this material.

Keywords: glass ionomer cement, aluminofluorosilicate glass, polyacid, dental material.

REFERENCES

1. Wilson A.D., Kent B.E. The glass-ionomer cement, a new translucent cement for dentistry. J. Appl. Chem. Biotechnol. 1971. Vol.21. No.11. Pp. 313–313. doi:10.1002/jctb.5020211101.
2. Gurgan S., Kutuk Z.B., Ergin E., Oztas S.S., Cakir F.Y. Clinical performance of a glass ionomer restorative system: a 6-year evaluation. Clin Oral Investig. 2017. Vol. 21. No. 7. Pp. 2335–2343. doi:10.1007/s00784-016-2028-4.
3. Manappallil J.J. Basic Dental Materials. II Edition. India: Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, 2003. 446 p. DOI: 10.5005/jp/books/10075.
4. Hassan M.M. Glass Ionomer Cements May Be Used as an Alternative to Composite Resins in Class II (CL II) Restoration of Primary Molars. J Evid Based Dent Pract. 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 1–13. doi:10.1016/j.jebdp.2020.101437.
5. Frencken J.E. The ART approach using glass-ionomers in relation to global oral health care. Dental Materials. 2010. Vol. 26. No. 1. Pp. 1–6. doi:10.1016/j.dental.2009.08.013.
6. Torres P.J., Phan H.T., Bojorquez A.K., Garcia-Godoy F., Pinzon L.M. Minimally Invasive Techniques Used for Caries Management in Dentistry. A Review. J Clin Pediatr Dent. 2021. Vol. 45. No. 4. Pp. 224–232. doi:10.17796/1053-4625-45.4.2.
7. Heintze S.D., Loguercio A.D., Hanzen T.A., Reis A., Rousson V. Clinical efficacy of resin-based direct posterior restorations and glass-ionomer restorations - An updated meta-analysis of clinical outcome parameters. Dent Mater. 2022. Vol. 38. No. 5. Pp. e109–e135. doi:10.1016/j.dental.2021.10.018.
8. Mustafa H.A., Soares A.P., Paris S., Elhennawy K., Zaslansky P. The forgotten merits of GIC restorations: a systematic review. Clin Oral Investig. 2020. Vol. 24. No. 7. Pp. 2189–2201. doi:10.1007/s00784-020-03334-0.
9. Alirezaei M., Bagherian A., Shirazi S.A. Glass ionomer cements as fissure sealing materials: yes or no?: A systematic review and meta-analysis. The Journal of the American Dental Association. 2018. Vol. 149. No. 7. Pp. 640–649.e9. doi:10.1016/j.adaj.2018.02.001.
10. Powers J.M., Wataha J.C. Dental materials: foundations and applications. Eleventh edition. Maryland Heights, Missouri: Mosby, 2015. 272 p.
11. Fricker J.P. Therapeutic properties of glass-ionomer cements: Their application to orthodontic treatment. Aust Dent J. 2022. Vol. 67. No. 1. Pp. 12–20. doi:10.1111/adj.12888.
12. Weintraub J.A. The effectiveness of pit and fissure sealants. J. Public Health Dent. 1989. Vol. 49. No. 5. Pp. 317–330. doi:10.1111/j.1752-7325.1989.tb02090.x.
13. Kervanto-Seppala S., Lavonius E., Pietila I., Pitkanieni J., Meuman J.H., Kerosuo E. Comparing the caries-preventive effect of two fissure sealing modalities in public health care: A single application of glass ionomer and a routine resin-based sealant programme. A randomized split-mouth clinical trial. Int. J. Paediatr. Dent. 2008. Vol. 18. No. 1. Pp. 56–61. doi:10.1111/j.1365-263X.2007.00855.x.
14. Yengopal V., Mickenautsch S., Bezerra A.C., Leal S.C. Caries-preventive effect of glass ionomer and resin-based fissure sealants on permanent teeth: A meta analysis. J. Oral Sci. 2009. Vol. 51. No. 3. Pp. 373–382. doi:10.2334/josnusd.51.373.
15. Berg J.H., Croll T.P. Glass ionomer restorative cement systems: an update. Pediatr Dent. 2015. Vol. 37. No. 2. Pp. 116–124.
16. Hill R.G., Wilson A.D. Some structural aspects of glasses used in ionomer cements. Glass Technol. 1988. Vol. 29. No. 4. Pp. 150–188.
17. Bidenko N.V. Glass ionomer cements in dentistry [Stekloionomernye cementy v stomatologii]. Kiev: Kniga pljus. 1999, 120 p. (rus)
18. Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. doi:10.1007/978-3-319-22626-2.
19. Shahid S., Hassan U., Billington R.W., Hill R.G., Anderson P. Glass ionomer cements: Effect of strontium substitution on esthetics, radiopacity and fluoride release. Dent. Mater. 2014. Vol. 30. No. 3. Pp. 308–313. doi:10.1016/j.dental.2013.12.003.
20. Van Noort R. Introduction to Dental Materials [Osnovy stomatologicheskogo materialovedeniya]. Richard Van Noort. Second Edition. Edinburgh: Mosby. Moscow: KMK-Invest. 2002, 304 p. (rus)
21. Nicholson J. W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society

- of Chemistry, 2020. 272 p. doi: 10.1039/9781788016360.
22. Rybakov A.I. Materials science in dentistry [Materialovedenie v stomatologii]. Moscow: Medicina. 1984, Pp. 311–313. (rus)
23. Trezubov V.N., Shtejngart M.Z., Minshnev L.M. Dental orthopaedics. Applied materials science [Ortopedicheskaja stomatologija. Prikladnoe materialovedenie] St. Petersburg: SpecLit. 2001, 328 p. (rus)
24. Mount G.J. An Atlas of Glass-Ionomer Cements: A Clinician's Guide. London: Martin Dunitz, 2003. 224 p.
25. Davidson C.L., Mjor I.A. Advances in Glass-Ionomer Cements. USA: Quintessence Publishing Co, 1999. 303 p.
26. Crisp S., Kent B.E., Lewis B.G., Ferner A.J., Wilson, A.D. Glass ionomer cement formulations. II. The synthesis of novel polycarboxylic acids. J. Dent. Res. 1980. Vol. 59. No. 6. Pp. 1055–1063. doi:10.1177/00220345800590060801.
27. Crisp S., Wilson A.D. Cements comprising acrylic and itaconic acid copolymers and fluoroaluminosilicate glass powder. Patent US, no. 4016124, 1977.
28. Crisp S., Lewis B.G., Wilson A.D. Gelation of polyacrylic acid aqueous solutions and the measurement of viscosity. Journal of Dental Research. 1975. Vol. 54. No. 6. Pp. 1173–1175. doi:10.1177/00220345750540061201.
29. Nicholson, J.W. Chemistry of glass-ionomer cements: A review. Biomaterials. 1998. Vol. 19. No. 6. Pp. 485–494. doi:10.1016/s0142-9612(97)00128-2.
30. Ellis J., Wilson A.D. Polyphosphonate cements: A new class of dental materials. J. Mater. Sci. Lett. 1990. Vol. 9. Pp. 1058–1060. doi:10.1007/BF00727876.
31. Nicholson J.W. Glass-ionomer cements for clinical dentistry. Mater. Technol. 2010. Vol. 25. Pp. 8–13.
32. Wilson A.D., Crisp S., Abel G. Characterisation of glass-ionomer cements 4; effects of molecular weight on physical properties. Journal of Dentistry. 1977. Vol. 5. No. 2. Pp. 117–120. doi: 10.1016/0300-5712(77)90070-7.
33. Hill R.G., Wilson A.D., Warrens C.P. The influence of poly(acrylic acid) molecular weight on the fracture toughness of glass-ionomer cements. Journal of Materials Science. 1989. Vol. 24. Pp. 363–371. doi:10.1007/BF00660982.
34. Wilson A.D., Hill R.G., Warrens C.P., Lewis B.G. The influence of poly(acrylic acid) molecular weight on some properties of glass-ionomer cement. Journal of Dental Research. 1989. Vol. 68. No. 2. Pp. 89–94. doi:10.1177/00220345890680021401.
35. McLean J.W., Wilson A.D., Prosser H.J. Development and use of water-hardening glass-ionomer luting cements. Journal of Prosthetic Dentistry. 1984. Vol. 52. No. 2. Pp. 175–181. doi:10.1016/0022-3913(84)90091-x.
36. Khoroushi M., Mansoori-Karvandi T., Hadi S.. The effect of pre-warming and delayed irradiation on marginal integrity of a resin-modified glass-ionomer. Gen Dent. 2012. Vol. 60. No. 6. Pp. e383–388.
37. Wilson A.D., Crisp S., Ferner A.J. Reaction in glass ionomer cements: IV. Effects of chelating comonomers on setting behaviors. Journal of Dental Research. 1976. Vol. 55. No. 3. Pp. 489–495. doi:10.1177/00220345760550033101.
38. Crisp S., Ferner A.J., Lewis B.G., Wilson A.D. Properties of improved glass-ionomer cement formulations. Journal of Dentistry. 1975. Vol. 3. No. 3. Pp. 125–130. doi:10.1016/0300-5712(75)90063-9.
39. Crisp S., Lewis B.G., Wilson A.D. Characterization of glass-ionomer cements. 5. The effect of the tartaric acid concentration in the liquid component. J. Dent. 1979. Vol. 7. No. 4. Pp. 304–312. doi:10.1016/0300-5712(79)90143-x.
40. Nicholson J.W., Brookman P.J., Lacy O.M., Wilson A.D. Fourier transform infrared spectroscopic study of the role of tartaric acid in glass-ionomer dental cements. J. Dent. Res. 1988. Vol. 67. No. 12. Pp. 1451–1454. doi:10.1177/00220345880670120201.
41. Braden M., Clarke R. L., Nicholson J., Parker S. Polymeric Dental Materials. Germany: Springer, 2012. 124 p. doi:10.1007/978-3-642-60537-6
42. Crisp S., Pringuer M.A., Wardleworth D., Wilson A.D. Reactions in glass-ionomer cements: II. An infrared spectroscopic study. J. Dent. Res. 1974. Vol. 53. No. 6. Pp. 1414–1419. doi:10.1177/00220345740530062001.
43. Pires R., Nunes T.G., Abrahams I., Hawkez G.E. Morais C.M. Fernandez, C. Stray-field imaging and multinuclear magnetic resonance spectroscopy studies on the setting of a commercial glass-ionomer cement. J. Mater. Sci. Mater. Med. 2004. Vol. 15. No. 3. Pp. 201–208. doi:10.1023/b:jmsm.0000015479.65516.d0.
44. Zainuddin N., Karpukhina N., Hill R.G., Law R.V. A long-term study on the setting reaction of glass ionomer cements by ²⁷Al MAS-NMR spectroscopy. Dent. Mater. 2009. Vol. 25. No. 3. Pp. 290–295. doi:10.1016/j.dental.2008.07.008.
45. Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. doi:10.1007/978-3-319-22626-2

Information about the authors

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

Buzov, Andrey A. PhD, technical director. E-mail: buzov@mail.ru. VladMiVa Experimental Plant JSC, Russia, 308023, Belgorod, st. Studencheskaya, 19.

Chuev, Vladimir P. DSc, Professor. E-mail: chuev@vladmiva.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov, Vladimir A. PhD, Assistant professor. E-mail: dva_vajik1975@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lukin, Evgeniy S. DSc, Professor. 3Mendeleev University of Chemical Technology. Russia, 125047, Moscow, Miusskaya Square, 9.

Received 27.06.2022

Для цитирования:

Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Лукин Е.С. Композиционные материалы на основе алюмофторсиликатного стекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 77–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-77-87

For citation:

Romanenko A.A., Buzov A.A., Chuev V.P., Doroganov V.A., Lukin E.S. Composite materials based on aluminofluorosilicate glass. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 77–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-77-87

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-88-98

^{1,*}Сиваченко Л.А., ²Потапов В.А., ²Кузьменкова М.С.¹Белорусско-Российский университет²Барановичский государственный университет

*E-mail: 228011@mail.ru

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ С ГИБКИМ ВОЛНОВЫМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Аннотация. В статье рассмотрены проблемные вопросы, связанные с комплексной переработкой неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов. На основе оценки технического уровня существующего оборудования обоснована необходимость его технологической модернизации и развития. Впервые предложена и обоснована концепция создания технологических машин с кинематически деформируемой волной рабочей камерой. Разработаны варианты технологических решений одно – и двухволновых аппаратов, которые могут быть использованы для проведения процессов смешивания, измельчения и разделения материалов по крупности, а также показаны основные особенности поведения гибких волновых поверхностей при взаимодействии с обрабатываемой средой. Описаны конструкции двух экспериментальных установок, приведены их технические характеристики, изложены состав обрабатываемых материалов и представлены результаты экспериментальных исследований по переработке карьерного мела, строительных смесей и твердых коммунальных отходов. Полученные данные позволяют судить о достаточно высокой технологической эффективности и необходимости дальнейшего развития аппаратов с волновым рабочим оборудованием, что выражается в достаточно высоком качестве получаемых продуктов, возможности управления их гранулометрическим составом, способности работать в условиях скачкообразного изменения свойств обрабатываемой среды, в том числе за счёт самоочищения элементов рабочей камеры и устранения заклинивания кусков материала в рабочих зонах и совмещения различных технологических функций в одном аппарате.

Ключевые слова: волновой аппарат, измельчение, смешивание, грохочение, гибкая камера, адаптивность, цепной агрегат, эффективность процесса.

Введение. Во многих отраслях промышленности требуется перерабатывать огромное количество материалов, которые характеризуются неоднородностью по составу и свойствам [1, 2]. К ним в первую очередь можно отнести сырьевые карьерные материалы (мел, глину, известняки, торф и др.), твердые коммунальные и строительные отходы, горно-химическое сырье, продукты лесо- и сельхозпереработки, а также осуществлять технологические переделы с дисперсными средами, которые отличаются реологической нестабильностью и требуют дополнительных операций, например, увлажнения или сушки. Все вышеперечисленные факты свидетельствуют о необходимости разработки многоцелевого оборудования, обеспечивающего эффективную переработку таких материалов и отвечающего требованиям энерго- и ресурсосбережения [3, 4]. Одним из направлений решения перечисленных задач может быть использование технологических аппаратов адаптивного действия, основанных на новых конструктивных исполнениях рабочего оборудования [5, 6].

Основная часть. Концепция оборудования основана на использовании рабочих камер технологических аппаратов, выполненных в виде кинематически деформируемых волновых гибких сплошных, перфорированных или составных оболочек, внутренние поверхности или элементы которых способны воздействовать на перерабатываемую среду с максимальной адаптивностью при проведении процессов измельчения, смешивания и разделения материалов по крупности [6, 7].

Важнейшей задачей на первом этапе проектирования технологических аппаратов с гибким волновым рабочим оборудованием является правильный выбор кинематической схемы. Для этого требуется проведение анализа вариантов движения гибких волновых рабочих органов, которые в значительной степени будут определять технологические возможности создаваемого оборудования. Для целостного восприятия вариантов движения гибких элементов воспользуемся методами анализа, структуры и кинематических связей в механизмах и приведем их к условиям работы технологических агрегатов [8].

Анализ и оценка конструктивного выполнения разрабатываемых аппаратов требует систематизации вариантов их технической реализации. В качестве основных критериев будем считать характеристики деформации волновой рабочей камеры и возможность при этом создавать условия, при которых обеспечивается максимальная технологическая эффективность при реализации различных процессов: измельчения, смешивания и разделения материалов по крупности. Конкретные примеры создания многоцелевых агрегатов с волновым рабочим оборудованием представлены на рисунке 1. По степени деформирования гибких волновых камер они разделены на одно- и двухволновые. Кратко рассмотрим разработанные конструктивные решения. При их описании приняты следующие основные обозначения, входящие в них элементов: 1 – гибкая волновая камера, 2 – шатун, 3 – кривошип, 4 – подвес маятникового рычага, 5 – направляющие, 6 – шарниры, 7 – амортизатор.

Схема 1. Волновая гибкая камера монтируется на вертикальном подвесе, совершающем под действием кривошипно-шатунного механизма колебательные движения. При этом волновая камера имеет возможность деформироваться только за счёт сил инерции её стенок и обрабатываемого материала. Аппарат может работать как смеситель или грохот с достаточно высокой эффективностью при сравнительно невысокой производительности. Конструкция проста в изготовлении и эксплуатации.

Схема 2. Рабочая камера деформируется синхронным перемещением её концов в горизонтальных направляющих, что реализуется приводным механизмом с двумя шатунами, причём ось привода расположена в верхней части аппарата. Усложнение таким образом конструкции особых технологических преимуществ не даёт. По применению это грохот или смеситель непрерывного действия.

Схема 3. Отличается от схемы 2 тем, что гибкая камера деформируется посредством горизонтального перемещения только одного из её сторон, что упрощает конструкцию, но не способствует интенсификации рабочего процесса.

Схема 4. Передача усилия от шатуна происходит на одну из боковых стенок волновой камеры выше нижней точки её провисания. Этим обеспечивается сложный характер деформирования гибкой оболочки, которая обеспечивает эффективную трансформацию энергии колебаний шатуна и преобразование её в интенсивные перемещения обрабатываемой среды, по сложным пространственным траекториям характер кото-

рых можно задавать изменением параметров колебаний шатуна, местом и направлением их приложения на рабочую камеру. В качестве недостатков такой конструкции можно считать необходимость устранения боковых колебаний конструкции, возникающих от действия инерционных сил с помощью амортизаторов. Отличается хорошей смесеобразовательной способностью и повышенной эффективностью процесса грохочения, особенно неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов.

Схема 5. Данное техническое решение предусматривает деформацию волновой камеры синхронным перемещением её боковых стенок посредством привода двух шарниров, связанных с вертикальным шатуном рычагов. За счёт этого гибкая оболочка рабочей камеры периодически изгибается с образованием двухволновой конфигурации, которая в зависимости от хода шатуна меняет свои очертания от выпуклых к вогнутым. Слабым местом конструкции является наличие в рабочем пространстве подвижных сопряжений, но при этом отсутствуют боковые реакции, передаваемые на корпус устройства. Имеет возможность практического значения как смеситель или грохот.

Схема 6. В отличие от схемы 5 вертикально установленные шатун связан с центральной частью внутренней стенки рабочей камеры и производит её перемещения с периодическим образованием двух симметричных волн различной направленности в зависимости от кинематики его движения. Конструкция проста в изготовлении и не требует уплотнения подвижных звеньев. В целом это перспективный технологический аппарат многоцелевого назначения.

Схема 7. Изогнутая по форме двух волн гибкая оболочка в своей центральной части связана с вертикальным подвесом маятникового рычага, расположенным по оси симметрии аппарата. Подвес одним концом установлен в шарнире и приводится в колебательные движения посредством кривошипно-коромыслового механизма. По мере перемещения подвеса волны рабочей камеры изменяют свою форму, совершая сложные движения по вертикали и горизонтали, что обеспечивает интенсивный механизм воздействия их внутренних поверхностей на обрабатываемые материалы. Отличается большим конструктивным многообразием, в том числе выполнением рабочей камеры из листовых элементов, перфорированной, в виде цепных гирлянд, с оснащением рабочего оборудования зубьями, ножами и т.д. Область применения измельчение, грохочение и смешивание, в крупнотоннажных производствах.

Схема 8. Отличается от схемы 7 верхним подвесом маятникового рычага и некоторыми особенностями движения материала в рабочей камере, который имеет большую составляющую движения в вертикальном направлении. На рабочем оборудовании отсутствует налипание и не

требуется специальных мер по защите от попадания в рабочую зону посторонних включений. Конструкция может найти широкое промышленное применение в частности при оснащении её цепными элементами для переработки неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов.

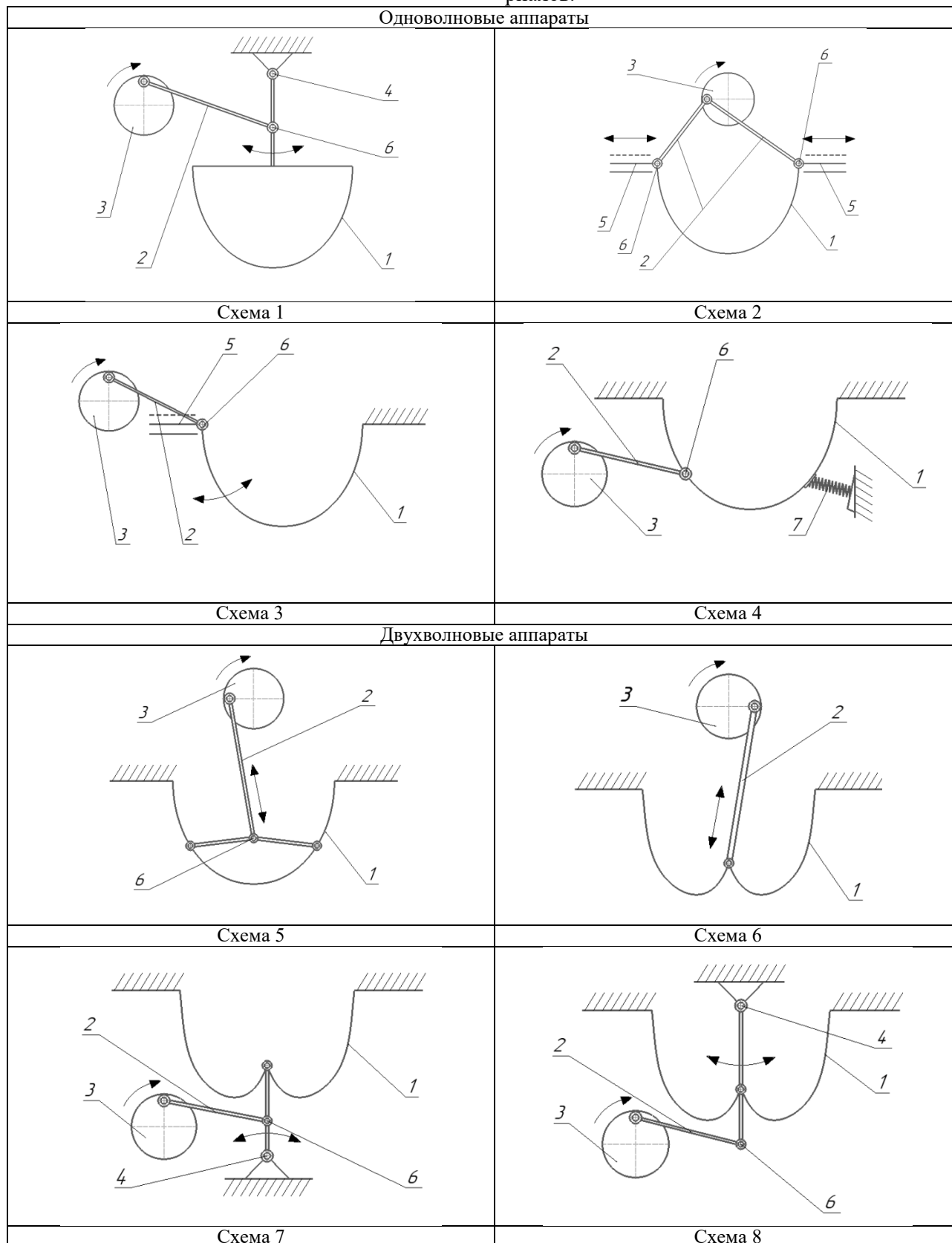


Рис. 1. Кинематические схемы волновых аппаратов

Выполненная по любой из схем 1–8 и установленная под углом к горизонту волновая рабочая камера является универсальной и в ней можно осуществлять процессы перемешивания, грохочения, измельчения или предварительной сушки, причем для грохочения ее гибкая оболочка с соответствующими отверстиями является ситом. Для целей перемешивания и сушки гибкая оболочка изготавливается гладкой. Во всех возможных вариантах применения гибкой оболочке сообщаются интенсивные перемещения, которые обеспечивают эффективное проведение рабочих процессов. С целью активизации технологических процессов рабочая камера может быть оснащена различными наборами интенсифицирующих устройств: цепями, зубьями, лопастями, ножами, щетками и т.д.

Основываясь на феноменологическом подходе и методе аналогий в качестве объектов для исследования выбраны одноволновой и двухволновой аппараты, соответствующие схемам 4 и 8 на рисунке 1. Приведем некоторые результаты исследования их рабочих процессов.

Аппарат с гибким одноволновым рабочим оборудованием. Общий вид одноволнового аппарата представлен на рисунке 2. Дополнительно к схеме 4 на рисунке 1 он снабжен интенсификаторами процесса, выполненными в виде свободно установленными на кронштейне в центральной части рабочей камеры цепными элементами.

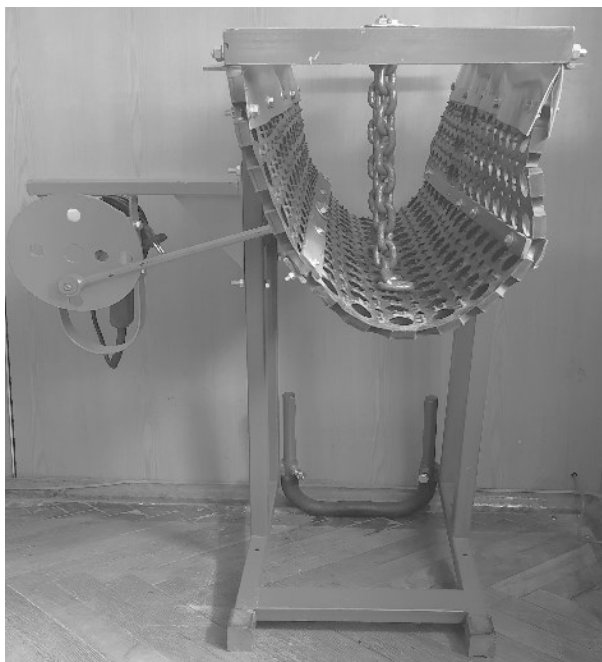


Рис. 2. Общий вид одноволнового аппарата

Технической гипотезой разработанной конструкции служит выполнение просеивающей поверхности, изогнутой по дуге и подверженной

таким колебаниям, которые приводят к перемещению разделяемого материала нормально по отношению к отверстиям на её внутренней поверхности α° .

Поставленная задача достигается тем, что в аппарате для грохочения трудноразделяемых материалов, содержащим раму, привод и просеивающую поверхность, согласно изобретению, просеивающая поверхность выполнена в виде установленного под углом к горизонту волнообразного гибкого перфорированного лотка, который посредством параллельной его продольной оси, закрепленной на одном из бортов выше нижней точки его провисания приводной планки связан с кривошипно-шатунным механизмом привода, а вторым бортом соединен с амортизаторами, закрепленными посредством опорной планки одним концом на стенке лотка выше нижней точки его провисания, а вторым концом на раме, причем приводная и опорная планки параллельны между собой.

В процессе работы аппарата волнообразному гибкому перфорированному лотку сообщаются интенсивные перемещения, что приводит в движение перерабатываемую среду, т.е. насыпной материал, который периодически сталкивается с поверхностью лотка, а куски или частицы, размер которых меньше размера просеивающих отверстий проходят через них в качестве подрешетного продукта. Волнообразная поверхность для просеивания обеспечивает сложное движение перерабатываемому продукту, частицы которого принудительно и с большим ускорением проталкиваются перед отверстием соответствующего им размера. В рабочей зоне происходит активное перемешивание, с поверхности кусков отбиваются мелкие частицы и пыль. При этом постепенно отсеивается мелкая фракция, а более крупная движется вниз по лотку. Именно такое конструктивное исполнение просеивающей поверхности и организация её движения способствует максимальной эффективности процесса грохочения. Резиновая гибкая кинематически деформируемая оболочка просеивающей поверхности полностью исключает налипание и забивание пропускных отверстий, а отсутствие в ней металлических элементов способствует значительному снижению шума при работе.

В дополнительных вариантах выполнения аппарата предусмотрено, что просеивающая поверхность выполнена из набора секций, размеры отверстий которых ступенчато увеличиваются от верхней части к нижней части лотка, причем просеивающая поверхность выполнена в виде листа из износостойкой резины, армированной высоко-

прочными волокнами, в частности металлическими. Для интенсификации процесса грохочения целесообразно над просеивающей поверхностью установить интенсификаторы процесса разделения, представляющие собой отрезки цепей, закрепленные одним концом на кронштейнах и свободно провисающих в центральной части гибкого перфорированного лотка, а для упрощения конструкции амортизаторов и улучшения демпфирования колебаний и возврата в крайнее положение их лучше всего изготавливать в виде цилиндрических пружин растяжения.

Для определения потенциальных возможностей одноволновых аппаратов проведён комплекс исследований по изучению процессов смешивания и разделения материалов по крупности, т.е. грохочения. Для этих целей использовалась установка со следующими характеристиками: размер рабочей камеры в плане – 650×250 мм, длина кривошипа – 30, 45, 60, 75 мм, частота вращения кривошипа – 0...600 об/мин, мощность приводного двигателя – 1,1 кВт. Для процесса смешивания гибкая рабочая камера выполнена в виде резинового листа, для процесса грохочения – перфорированного с круглыми отверстиями диаметром 30 мм.

Смешивание проводилось на сухих строительных смесях с крупностью заполнителя до 5

мм. В качестве ключевого компонента использовался рубленый квадратный полиэтилен размерами 5×1 мм. Исследовался один рабочий режим: частота вращения кривошипа $n = 300$ об/мин, длина кривошипа $r = 60$ мм. При этом переменным фактором служил угол наклона рабочей камеры к горизонту. Полученные результаты в виде графика влияния угла установки α° рабочей камеры на однородность смеси X и производительность Π смесителя представлены на рисунке 3 а.

Исследование процесса грохочения в волновом аппарате проводилось на различных отходах неопределённых размеров, формы, плотности и т.д. (твёрдые коммунальные отходы). Здесь также использовался один рабочий режим: частота вращения кривошипа $n = 300$ об/мин, длина кривошипа $r = 60$ мм, а переменным фактором служит угол наклона α° рабочей камеры к горизонту. Полученные результаты в виде графика влияния угла установки α° рабочей камеры на эффективность C грохочения и производительность Π грохота представлены на рисунке 3 б.

Визуальная оценка разделяемого в одноволновом аппарате материала иллюстрируется рисунком 4.

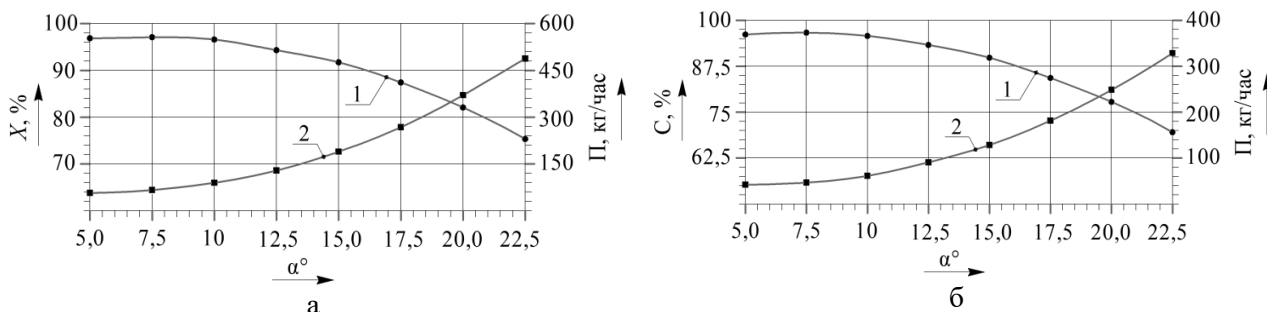


Рис. 3. Влияние угла установки α° рабочей камеры на эффективность работы процессы волнового аппарата
а – процесс перемешивания; б – процесс грохочения



а



б

Рис. 4. Визуальная оценка разделяемого материала
а – исходный материал; б – материал после грохочения

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод, что наиболее эффективной работа одноволнового аппарата на углах наклона рабочей камеры $12...15^\circ$. При этом расслоение смеси не наблюдалось, а в рабочей камере компоненты смеси достаточно равномерно распределяются как по длине, так и по сечению. Общее время нахождения исходных компонентов на волновом лотке, как правило, не превышает $8...10$ секунд при общей высокой интенсивности процесса.

Оценивая работу волнового смесителя можно отметить, что подобный способ перемешивания грубодисперсных сред может найти применение для приготовления силикатных формовочных смесей, в технологиях получения жестких бетонных смесей, для приготовления комбикорма и т.д. В дальнейшем планируется исследовать влияние влажности исходных компонентов на кинетику и качество приготовленных смесей.

В процессе испытаний такого аппарата установлено, что перфорированная волновая поверхность при размерах отверстий 30 мм является эффективным рабочим оборудованием для сортировки трудноразделяемых материалов. На такой поверхности отсутствует налипание, а просеивающие отверстия не забиваются исходными кусками. Полученные зависимости показывают, что перспективной областью использования одноволнового грохота является разделение неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов, в том числе твердых коммунальных отходов.

Итоговой оценкой разработанного одноволнового оборудования, а это в равной степени относится и к смесителю, и к грохоту, следует считать его хорошую работоспособность и достаточно высокую технологическую эффективность. Для доведения представленных конструкций до промышленного использования необходимо выполнить соответствующий этап НИОКР, а также разработать технологию изготовления волновых рабочих органов, которые бы отличались износостойкостью, усталостной прочностью, малыми сопротивлениями деформированию и т.д.

Двухволновой цепной агрегат. Практическая реализация аппарата соответствующего кинематической схеме №8, осуществлена в виде двухволнового цепного агрегата [7], а его общий вид представлен на рисунке 5.

Работа цепного агрегата происходит следующим образом. Электродвигатель приводит в действие кривошип 1, который вращается с заданной частотой вращения. Один конец шатуна 2

связан с кривошипом 1, а другой с маятниковыми рычагами 3. Шатун 2, совершая плоскопараллельное движение, приводит в действие маятниковые рычаги 3, на котором жестко закреплена штанга 4, при этом движение сообщается цепным полотнам 6 (на которых могут быть установлены съемные планки 7) и гибким стенкам 5. Таким образом, всё рабочее оборудование совершает вынужденные колебания с определенной частотой и амплитудой, величины которых можно изменять в определенном диапазоне.

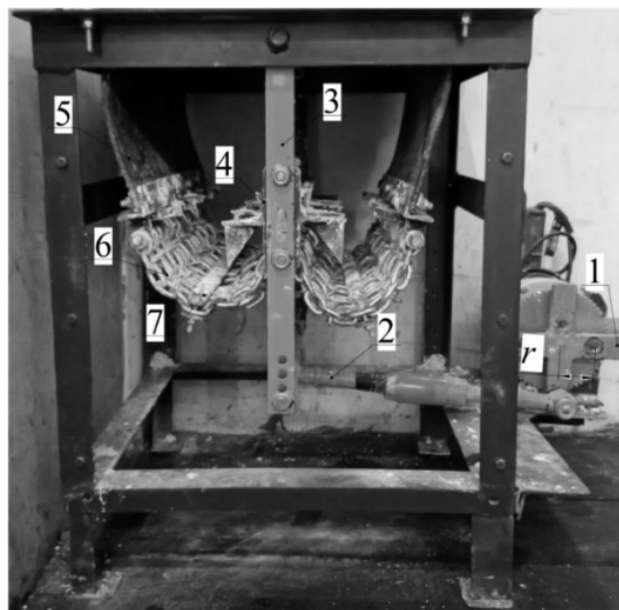


Рис. 5. Общий вид двухволнового цепного агрегата
1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – маятниковые рычаги (второй на рисунке не показан);
4 – штанга; 5 – гибкие стенки; 6 – цепные полотна;
7 – съемные планки; r – длина кривошипа

Спроектированный цепной агрегат имеет размеры приемного отверстия в плане 450×350 мм, объем рабочей камеры $0,046 \text{ м}^3$, мощность приводного электродвигателя $1,1 \text{ кВт}$. Частота вращения кривошипа n_k изменяется плавно в диапазоне $0...600$ об/мин, а его длина r изменяется ступенчато – $30, 45, 60, 75$ мм.

Технологические испытания двухволнового цепного агрегата проводились на различных кусковых материалах: мелоглинистом с размером исходной фракции $5...100$ мм и влажностью $15...18\%$, комовой глины влажностью $12...15\%$, известковом материале крупностью $20...50$ мм и влажностью $2...5\%$, отходах извола в виде рассыпчатого материала с размерами единичных кусков $30...100$ мм, сухих и увлажненных смесей перечисленных материалов, а также мела влажностью $21...26\%$ и крупностью $0...100$ мм.

Процесс измельчения перечисленных материалов заключался в сочетании нескольких

способов силового воздействия на материал, а именно ударного, раскалывающего и истирающего. При этом волновые поверхности за счет перемещений маятниковых рычагов изменяли свою форму и, таким образом, сообщали обрабатываемым материалам смежные движения с периодической подачей его на ударные элементы. Цепные полотна измельчение практически не производят, а выполняют функции грохота с границей разделения соответствующей зазорам между звеньями цепных элементов, которые в приведенном варианте выполнения рабочего оборудования составляли 25...28 мм.

На основании данных технологических испытаний установлено, что одной из перспективных областей использования цепного агрегата является его применение при переработке мела в технологии производства извести сухим способом [9, 10]. В качестве перерабатываемого материала использовался мел, применяемый в ОАО «Красносельскстройматериалы» при производстве извести.

С учетом представленных в работах [4, 11–13] рекомендаций, нами выбраны требования к

условиям технологической подготовки мела к обжигу: фракционный состав сырья должен находиться в пределах 5...25 мм; сырье должно иметь близкие по размеру частицы; после измельчения частицы должны иметь неправильную округлую форму с многогранной рыхлой поверхностью. Руководствуясь данными условиями, были проведены исследования, направленные на получения материала, соответствующего этим требованиям.

Поэтапно проведем анализ выполнения данных требований при использовании цепного агрегата в качестве машины для первичного измельчения сырья.

С учетом сформулированных требований следует определить выход фракции мела в предпочтительном диапазоне 5...25 мм. Эксперименты проводились на материале влажностью 21...26 % и среднем размере исходной фракции 38 мм. Доля фракции 0...5 мм в исходном материале составляла 20 %. Варьируемые факторы – частота вращения кривошипа n_k и его длина r . Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 6.

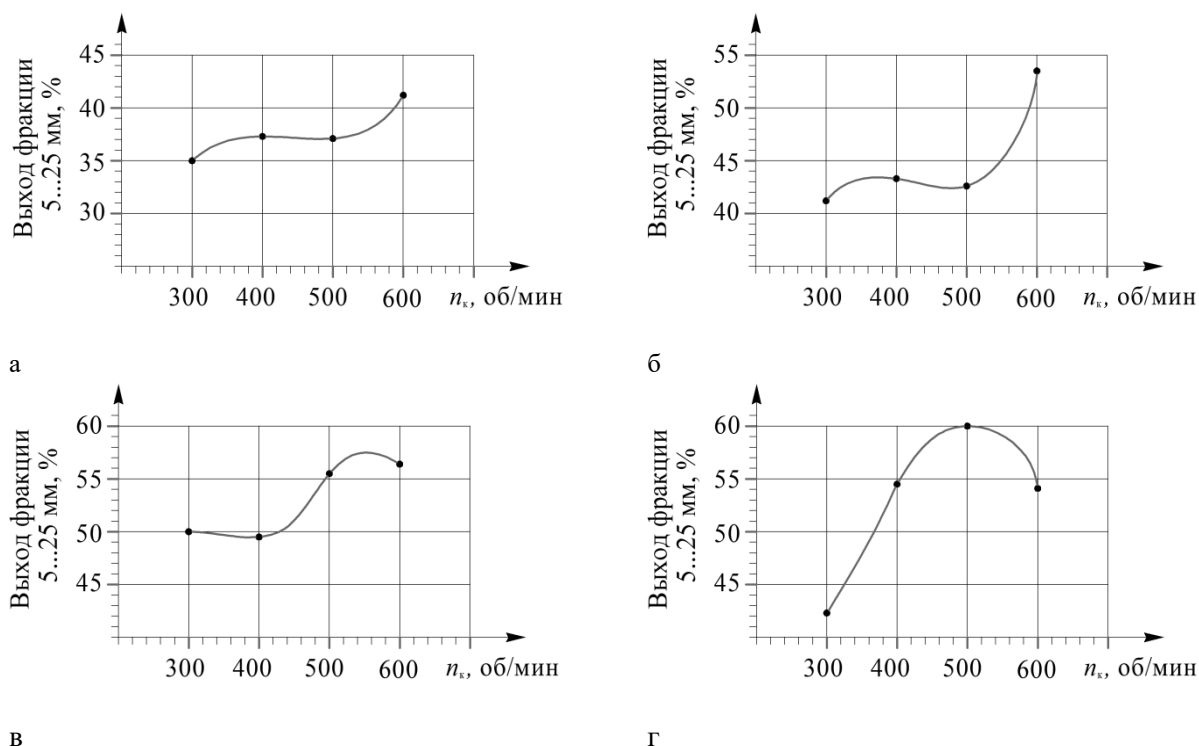


Рис. 6. Влияние частоты вращения n_k и длины кривошипа r на процесс измельчения мела
 а – длина кривошипа $r = 30$ мм; б – длина кривошипа $r = 45$ мм; в – длина кривошипа $r = 60$ мм;
 г – длина кривошипа $r = 75$ мм

Анализируя полученные результаты можно сделать заключение, что выход фракции мела в диапазоне 5...25 мм зависит от варьируемых факторов. При длине кривошипа $r = 30$ и 45 мм выход предпочтительной фракции находится на уровне 35...53,5 %, а при длине кривошипа $r = 60$

и 75 мм — 49,5...60 %. Следует отметить, что повышение частоты вращения n_k при больших значениях длины кривошипа r приводит к снижению выхода предпочтительной фракции, это обусловлено многократным силовым воздействием

на материал, который не успевает покинуть камеру цепного агрегата и в конечном итоге приводит к переизмельчению сырья.

Выполнение второго условия было оценено по выходу предпочтительной фракции в виде двух групп 5...15 и 15...25 мм. Выход фракции 15...25 мм преобладал и в среднем изменялся в диапазоне 50...70 % в зависимости от варьируемых факторов. Таким образом, можно сделать заключение, что материал, достигший размера просеивающих отверстий, быстро удаляется из рабочей камеры, что является свидетельством высокой селективной способности такого оборудования [14].

После переработки частицы мела имеют многогранную рыхлую поверхность (рис. 7), что соответствует изложенным требованиям подготовки сырья перед обжигом.

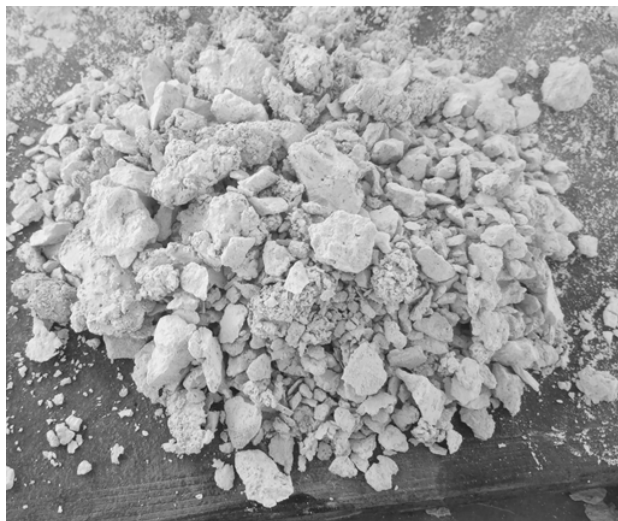


Рис. 7. Состав материала после измельчения в цепном агрегате

Проведенное исследование свидетельствует о потенциале цепных агрегатов, как о машинах, способных выполнять технологические задачи по переработке различных сырьевых материалов, в частности переработки мела в технологии производства извести сухим способом. Следует отметить, что цепной агрегат может быть использован не только в качестве машины для осуществления измельчения неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов, но и в качестве грохота, например, для очистки балласта на железной дороге, сортировки твердых коммунальных, строительных и промышленных отходов и решения ряда других технологических задач [15].

Выводы

1. Сформулирована концепция использования рабочих камер технологических машин в

виде кинематически деформируемых волновых гибких сплошных, перфорированных или составных оболочек внутренние поверхности или элементы которых, обеспечивают проведение соответствующих процессов смешивания, измельчения и разделения материалов по крупности.

2. Разработаны варианты конструктивных решений волновых аппаратов и на основе их конструктивного анализа для проведения технологических испытаний и практической реализации выбраны одноволновой аппарат с боковым приводом и двухволновой с верхним подвесом маятниковых рычагов.

3. На созданном экспериментальном оборудовании проведен комплекс технологических исследований по переработке различных материалов и в результате которых установлено, что на одноволновом аппарате можно с высокой эффективностью производить перемешивание и разделение материалов по крупности, а на двухволновом перерабатывать влажные сырьевые материалы и различные виды отходов с возможностью селективного управления качеством обработанных продуктов. Энергетические затраты на проведение этих процессов ниже по сравнению с оборудованием аналогичного назначения.

4. Обоснованы некоторые направления развития волновых аппаратов, включающие оптимизацию их геометрических, кинематических и энергосиловых параметров, определение рациональных областей использования, а также выбор материалов и технологий для изготовления рабочего оборудования в целом и отдельных его элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П., Костин И.М., Финкельштейн Г.А., Хопунов Э.А., Яшин В.П. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
2. Бабенко С.А., Ильин А.П., Коробочкин В.В., Семакина О.К. Порошки (получение, свойства, анализ): монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 264 с.
3. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высшая школа, 1971. 382 с.
4. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов и изделий: учебник. Белгород: «Везелица», 2007. 512 с.

5. Сиваченко Л.А., Голушкова О.В., Шуляк В.А., Кутынка Е.И., Богатырев М.Г. Технологические аппараты адаптивного действия: монография. Минск: БГУ, 2008. 375 с.

6. Сиваченко Л.А., Сотник Л.Л., Сиваченко Т.Л., Потапов В.А., Абдукаликова Г.М., Корзун И.М., Наливко О.И., Дыдышко И.М. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия: монография. Барановичи: БарГУ, 2020. 359 с.

7. Пат. 038851, Евразийский патент, МПК В02С19/16. Агрегат для переработки неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов / Л.А. Сиваченко, В.А. Потапов, Т.Л. Сиваченко; заявитель и патентообладатель Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Сиваченко Т.Л. №202090391; заявл. 26.02.2020; опубл. 28.10.2021, Бюл. №10. 9 с.

8. Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы: справочное пособие. М.: Машиностроение, 1976. 784 с.

9. Сиваченко Л.А., Потапов В.А. Использование цепного агрегата в технологии производства извести // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы Международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С. 366–369.

10. Потапов В.А., Сиваченко Л.А., Дремук В.А. Исследование влияния режимов работы

цепного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». 2021. №9. С. 37–43.

11. Максименко В.Л., Кузьменков М.И., Лукаш Е.В., Стародубенко Н.Г. Совершенствование технологии производства строительной извести из переувлажненного сырья // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Международной научно-технической конференции. Минск: Изд-во БГТУ, 2015. С. 66–69.

12. Монастырев А.В. Пути снижения расхода топлива при обжиге мела с получением извести в длинных вращающихся печах // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 9–15.

13. Бутт Ю.М., Окорочков С.Д., Сычев М.М., Тимашев В.В. Технология вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1965. 620 с.

14. Попов А.М., Руднев С.Д., Рыбина О.Е. О селективном измельчении, селективности измельчения и селективной функции // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2006. № 5. С. 42–44.

15. Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: БРУ, 2017. 254 с.

Информация об авторах

Сиваченко Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры транспортных и технологические машины. E-mail: 228011@mail.ru. Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет». Республика Беларусь, 212000, Могилев, пр-т. Мира, д. 43.

Потапов Владимир Александрович, старший преподаватель кафедры технического обеспечения процессов сельскохозяйственного производства и агрономии. E-mail: vladimir-potapov-1990@mail.ru. Барановичский государственный университет, Республика Беларусь, 225404, г. Барановичи, ул. Войкова, д. 21.

Кузьменкова Мария Сергеевна, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроения. E-mail: maryiask@yandex.ru. Барановичский государственный университет, Республика Беларусь, 225404, г. Барановичи, ул. Войкова, д. 21.

Поступила 01.07.2022 г.

© Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Кузьменкова М.С., 2022

^{1,*}*Sivachenko L.A.*, ²*Potapov V.A.*, ²*Kuzmenkova M.S.*

¹*Belarusian-Russian University*

²*Baranovich State University*

*E-mail: 228011@mail.ru

MULTIFUNCTIONAL TECHNOLOGICAL APPARATUSES WITH FLEXIBLE WAVE WORKING EQUIPMENT

Abstract. The article deals with problematic issues related to the complex processing of materials that are heterogeneous and complex in composition and properties. The necessity of its technological moderniza-

tion and development is substantiated on the basis of assessment of the technical level of the existing equipment. For the first time, the concept of creating technological machines with a kinematically deformable wave working chamber is proposed and substantiated. Variants of technological solutions for one- and two-wave apparatuses have been developed. They can be used for mixing, grinding and separating materials by size. The main features of the behavior of flexible wave surfaces when interacting with the processed medium are shown. The design of two experimental installations is described, their technical characteristics are given, the composition of the processed materials is stated. The results of experimental studies on the processing of quarry chalk, building mixtures and municipal solid waste are presented. The data obtained make it possible to judge a sufficiently high technological efficiency and the need for further development of devices with wave working equipment, which is expressed in a sufficiently high quality of the products obtained, the ability to control their particle size distribution, the ability to work in conditions of an abrupt change in the properties of the treated medium, including due to self-cleaning elements of the working chamber and the elimination of jamming of pieces of material in the working areas and the combination of various technological functions in one apparatus.

Keywords: wave apparatus, grinding, mixing, screening, flexible chamber, adaptability, chain unit, process efficiency.

REFERENCES

1. Revnitshev V.I., Gaponov G.V., Zarogatsky L.P., Kostin I.M., Finkelstein G.A., Hopunov E.A., Yashin V.P. Selective mineral destruction. [Selektivnoe razrushenie mineralov]. Moscow: Nedra, 1988. 286 p. (rus)
2. Babenko S.A., Ilyin A.P., Korobochkin V.V., Semakina O.K. Powders (obtaining, properties, analysis). [Poroshki (poluchenie, svojstva, analiz)]: monograph. Tomsk: Publishing House of TPU, 2011. 264 p. (rus)
3. Sapozhnikov M.Ya. Mechanical equipment of enterprises of building materials, products and structures. [Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatij stroitel'nykh materialov, izdelij i konstrukcij]. Moscow: Higher school, 1971. 382 p. (rus)
4. Bogdanov V.S., Ilyin A.S., Semikopenko I.A. Processes in the production of building materials and products. [Processy v proizvodstve stroitel'nykh materialov i izdelij]: textbook. Belgorod: "Vezelitsa", 2007. 512 p. (rus)
5. Sivachenko L.A., Golushkova O.V., Shulyak V.A., Kutynko E.I., Bogatyrev M.G. Technological apparatuses of adaptive action. [Tekhnologicheskie apparaty adaptivnogo dejstviya]: monograph. Minsk: BGU, 2008. 375 p. (rus)
6. Sivachenko L.A., Sotnik L.L., Sivachenko T.L., Potapov V.A., Abdusalikova G.M., Korzun I.M., Nalivko O.I., Dydyshko I.M. Intensification of technological processes in apparatuses of adaptive action. [Intensifikatsiya tekhnologicheskikh processov v apparatah adaptivnogo dejstviya]: monograph. Baranovichy: BarSU, 2020. 359 p. (rus)
7. Sivachenko L.A., Potapov V.A., Sivachenko T.L. Unit for processing heterogeneous and complex in composition and properties of materials. Eurasian patent, no. 202090391, 2021.
8. Kozhevnikov S.N., Esipenko Ya.I., Raskin Ya.M. Mechanisms. [Mekhanizmy]: Reference manual. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 784 p. (rus)
9. Sivachenko L.A., Potapov V.A. Use of a chain unit in lime production technology. [Ispol'zovanie cepnogo agregata v tekhnologii proizvodstva izvesti]. Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: materials of the International Scientific and Practical Conference. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2020. Pp. 366–369. (rus)
10. Potapov V.A., Sivachenko L.A., Dremuk V.A. Research of the influence of the operating modes of the chain unit on the indicators of the process of grinding chalk in the technology of lime production. [Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty cepnogo agregata na pokazateli processa izmel'cheniya mela v tekhnologii proizvodstva izvesti]. Bulletin of BarSU. Series "Technical Sciences". 2021. No. 9. Pp. 37–43. (rus)
11. Maksimenko V.L., Kuzmenkov M.I., Lukash E.V., Starodubenko N.G. Improving the technology for the production of building lime from waterlogged raw materials. [Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva stroitel'noj izvesti iz pereuvlazhnennogo syr'ya]. Latest achievements in the field of innovative development in the chemical industry and production of building materials: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Minsk: Publishing House of BSTU, 2015. Pp. 66–69. (rus)
12. Monastirev A.V. Ways to reduce fuel consumption when firing chalk to obtain lime in long rotating furnaces. [Puti snizheniya raskhoda topliva pri obzhige mela s polucheniem izvesti v dlinnykh vrashchayushchih pechah]. Construction materials. 2010. No. 9. Pp. 9–15. (rus)
13. Butt Yu.M., Okorokov S.D., Sychev M.M., Timashev V.V. Technology of binders. [Tekhnologiya vyazhushchih veshchestv]. Moscow: Higher school, 1965. 620 p. (rus)

14. Popov A.M., Rudnev S.D., Rybina O.E. About selective grinding, selectivity of grinding, and selective function. [O selektivnom izmel'chenii, selektivnosti izmel'cheniya i selektivnoj funkcii]. Proceedings of higher educational institutions. Food technology. 2006. No. 5. Pp. 42–44. (rus)

15. Sivachenko L.A., Sivachenko T.L. Technological mechanical engineering is an innovative reserve of the world economy. [Tekhnologicheskoe mashinostroenie – innovacionnyj rezerv mirovoj ekonomiki]: monograph. Mogilev: BRU, 2017. 254 p. (rus)

Information about the authors

Sivachenko, Leanid A. DSc, Professor E-mail: 228011@mail.ru. Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Republic of Belarus, 212000, ave. Mira, 43.

Potapov, Vladimir A. Senior lecturer. E-mail: vladimir-potapov-1990@mail.ru. Baranovichi State University, Republic of Belarus, 225404, Baranovichi, st. Voykova, 21.

Kuzmenkova, Maria S. Postgraduate student. E-mail: maryiask@yandex.ru. Baranovichi State University, Republic of Belarus, 225404, Baranovichi, st. Voykova, 21.

Received 01.07.2022

Для цитирования:

Сиваченко Л.А., Потапов В.А., Кузьменкова М.С. Многоцелевые технологические аппараты с гибким волновым рабочим оборудованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 88–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-88-98

For citation:

Sivachenko L.A., Potapov V.A., Kuzmenkova M.S. Multifunctional technological apparatuses with flexible wave working equipment. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 88–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-88-98

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107

Севостьянов В.С., *Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: tkmm_bstu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ ГРАНУЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье проведен анализ применения технологии компактирования в различных сферах производственной деятельности. Определено направление проведения научно-технических разработок, теоретических и экспериментальных исследований процессов агломерации порошкообразных и вязко-пластичных материалов, а также материалов анизотропной структуры для получения сформованных тел заданной гранулометрии с целью улучшения их потребительских свойств. Приведена математическая модель, описывающая условия движения материала в камере гранулирования, которая была представлена в виде системы дифференциальных уравнений для движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат. По результатам аналитического решения уравнений установлено, что скорость сдвиговых деформаций слоя гранулируемого материала по ширине камеры цилиндрической формы изменяется неравномерно, то есть степень свободы находящихся в ней частиц ограничена. Предложено решение по устранению данного недостатка путем создания более благоприятных условий для реализации процессов гранулообразования, которые могут быть достигнуты в торообразной или близкой к ней по форме камере за счет интенсификации объемно-пространственного перемещения материала. Результаты теоретических исследований подтверждаются при физическом моделировании технологического процесса гранулообразования и свидетельствуют о целесообразности предложенных технических решений.

Ключевые слова: переработка, техногенные материалы, гранулообразование, математическая модель, движение материала, скорость сдвиговых деформаций, моделирование процесса.

Введение. Во многих сферах производственной деятельности широкое применение находит технология компактирования материалов: гранулирование, экструдирование, брикетирование и другие. Каждый из этих способов обладает своими достоинствами и технологически целесообразен. При этом должны быть учтены технологические способы использования сформованных тел для производства строительных изделий, облегченных конструкций, теплоизоляционных смесей и покрытий; поризованных материалов, обладающих повышенной фильтрующей способностью; уплотненных техногенных материалов при их термической обработке и др. [1–10].

В некоторых случаях процесс получения гранул сферообразной или близкой к ней формы является более предпочтительным, так как позволяет сохранить им товарный вид и потребительские свойства, снизить потери при перевозке и хранении без смерзания и пыления, повысить сыпучесть сплошной среды, обеспечить более плотную упаковку полифракционных сформованных тел [11, 12].

Однако, существующие машины и аппараты для гранулирования материалов (окаточные барабаны, тарельчатые и вибрационные грануля-

торы) не всегда обеспечивают условия для необходимого динамического воздействия на обрабатываемый материал и получение сформованных тел из вязко-пластичных материалов с заданными характеристиками (фракционным составом, плотностью, прочностью и др.) [11].

В связи с этим возникает необходимость проведения научно-технических разработок, теоретических и экспериментальных исследований процессов агломерации порошкообразных, вязко-пластичных материалов, а также материалов анизотропной структуры, например, фиброапполнителей для получения сформованных сферообразных тел заданной гранулометрии.

Материалы и методы. При проведении теоретических исследований было принято, что предварительно подготовленные компоненты смеси со связующим поступают в камеру гранулирования (рис. 1), где подвергаются воздействию центробежных сил $F_{ц}$ и сил трения $F_{тр}$, возникающих в результате ее движения с постоянной угловой скоростью ω по круговой траектории с центром вращения в точке О. Горизонтальная ось камеры находится на расстоянии $R_{ОА}$ от центра О, то есть в сечении А-А отрезок ОА равен эксцентриситету e эксцентрикового вала. Камера выполнена так, что диаметр D_k больше ее ширины B_k .

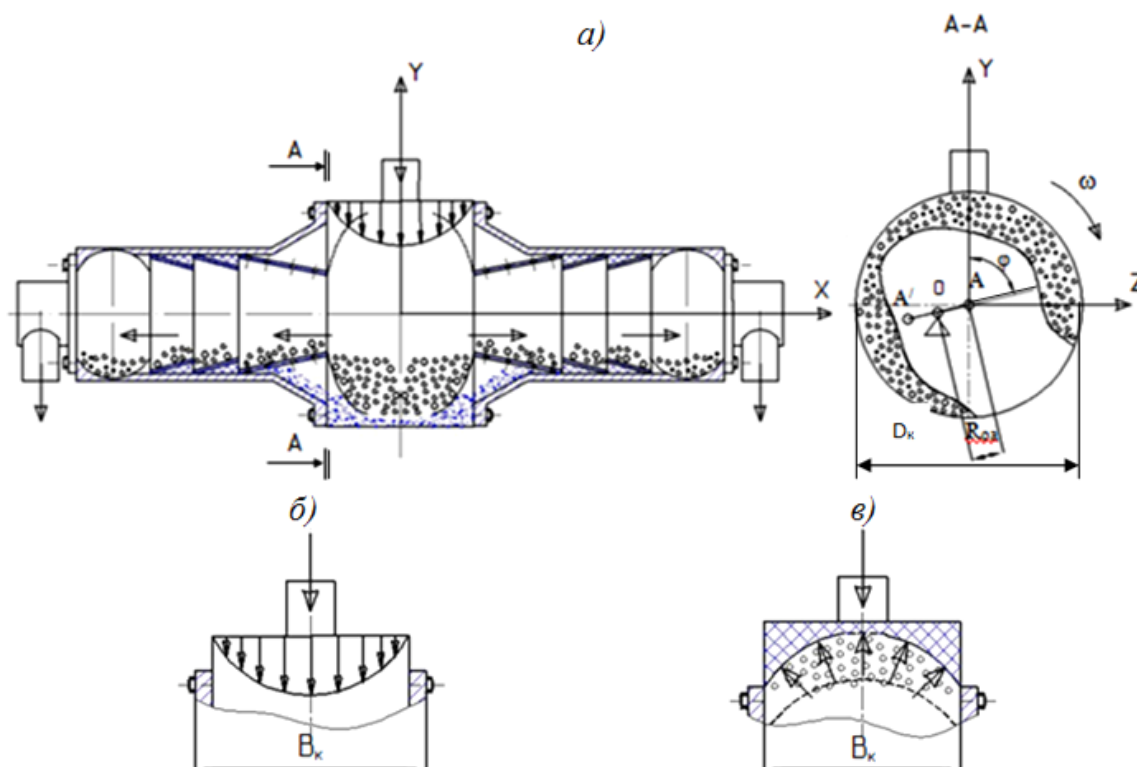


Рис. 1. Схема к расчету условий движения материала в камере гранулирования:
а) общий вид; б) эпюра скоростей потока в цилиндрической камере;
в) эпюра скоростей потока в сферообразной камере

Допускаем, что в процессе работы агрегата камера перемещается на некоторый угол φ , а материал внутри нее движется в установившемся режиме и, достигнув наибольшего уплотнения, не деформируется, то есть образуется несжимаемый слой.

Основная часть. Для математической модели, описывающей условия движения материала в цилиндрической системе координат, может быть применена система дифференциальных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [13]. В данном случае эта система будет представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial \varphi} + v_{R_k} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial t} - \frac{v_\varphi^2}{R_k} = F_{R_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_k} + \lambda \left(\Delta_{R_k} - \frac{v_{R_k}}{R_{OA}^2} - \frac{2}{R_{OA}^2} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_\varphi}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_{R_k} v_\varphi}{R_{OA}} = F_{R_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_k} + \lambda \left(\Delta_\varphi - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} - \frac{2}{R_{OA}^2} \cdot \frac{\partial v_{R_k}}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_z}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = F_{R_k} - \frac{\partial P}{\rho \partial z} + \lambda_\Delta v_z. \end{cases} \quad (1)$$

где R_k – радиус камеры гранулирования, м; R_{OA} – эксцентриситет эксцентрикового вала ($R_{OA} = e$), м; φ – угол поворота камеры гранулирования, град; ρ – плотность слоя материала, кг/м³; v_z , v_{R_k} , v_φ – скорости движения слоя материала по внутренней поверхности камеры гранулирования в направлении оси Z, радиуса R_k , вращения камеры, соответственно, м/с; P – давление, Па; F_{R_k} – сила, действующая на материал в камере гранулирования; Н.

Условие несжимаемости:

$$\frac{\partial v_{R_k}}{\partial R_k} + \frac{v_{R_k}}{R_{OA}} + \frac{v_\varphi}{R \partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial R_k^2} + \frac{1}{R_{OA}} \cdot \frac{\partial}{\partial R_k} + \frac{1}{R_{OA}^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3)$$

В решении данного уравнения целесообразно учесть ряд следующих обстоятельств. Камера вращается с постоянной скоростью, а материал поступает в нее непрерывно и равномерно, то есть $\partial v / \partial t = 0$. При отсутствии сжимаемости слоя $\rho = \text{const}$. Действие массовых сил можно не учитывать ($F_m = 0$) виду их незначительной величины. Движение слоя по внутренней поверхности камеры в направлении оси Z и радиуса R не осуществляется. Тогда скорости $v_z = 0$ и $v_R = 0$. В свою очередь, скорость потока в направлении вращения камеры постоянна, поэтому $\partial v_\varphi / \partial \varphi = 0$. Однако, скорость движения слоя по ширине камеры будет изменяться под действием сил трения, возникающих в ее внутреннем объеме и у боковых стенок. Следовательно, $\partial v_\varphi / \partial z \neq 0$.

$$\Delta v_\varphi = \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial R_\kappa^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial R_\kappa} + \frac{1}{R_{OA}^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2}. \quad (5)$$

При принятом ранее условии:

$$\frac{d^2 v_\varphi}{dR_\kappa^2} = 0, \quad \Delta v_\varphi = \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В этом случае система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{v_\varphi^2}{R_{OA}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_\kappa}; \\ 0 = -\frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} \right); \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial z}. \end{cases} \quad (7)$$

После разделения переменных по функциям φ и Z , а также при $\frac{\partial P}{\partial \varphi} = C$, получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$v_\varphi = C_1 \exp(ZR_{OA}^{-1}) + C_2 \exp(-ZR_{OA}^{-1}) - CR_{OA}\mu^{-1} \quad (11)$$

Примем во внимание, что движение материала в камере, осуществляемое за счёт центробежных сил, приводит к возникновению сил трения о ее внутреннюю поверхность. Тогда при определении условий получения гранул значительное влияние имеет фактор (величина и характер изменения) скорости сдвиговых деформаций v_φ по

Для определения оптимального профиля камеры гранулирования установим характер изменения скорости v_φ в направлении оси Z . Тогда, с учетом принятых выше допущений, запишем систему уравнений (1) в виде:

$$\begin{cases} \frac{v_\varphi^2}{R_\kappa} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_\kappa}; \\ 0 = -\frac{1}{\rho R_{OA}} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \partial \left(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} \right); \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}, \end{cases} \quad (4)$$

Здесь оператор Лапласа:

$$\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} = \frac{C}{R \cdot \mu}. \quad (8)$$

Это уравнение может быть представлено в общем виде:

$$v_\varphi = v_\varphi + v_\varphi', \quad (9)$$

где v_φ – общее решение однородного уравнения; v_φ' – частное решение неоднородного уравнения.

Применим метод неопределённых коэффициентов, для которого:

$$\begin{cases} v_\varphi = C_1 \exp(ZR^{-1}) + C_2 (\exp - ZR^{-1}); \\ v_\varphi' = -CR\mu^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

В результате получим неоднородное дифференциальное уравнение вида:

ширине камеры B_κ . При этом у боковых стенок камеры значения v_φ (в пристенных слоях) минимальны, а в средней части камеры максимальны.

Учитывая ряд условий ($Z = 0$; $Z = B_\kappa$ и $Z = 0,5B_\kappa$), постоянные примут вид:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 - C \frac{R_{OA}}{\mu} = 0; \\ C_1 \exp \frac{B_k}{R_{OA}} + C_2 \exp \left(-\frac{B_k}{R_{OA}} \right) - \frac{CR}{\mu} = 0; \\ C_1 \exp \left[\frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right] + C_2 \exp \left(-\frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right) - C \left(R_{OA} + \frac{R_k}{\mu} \right) = 2\pi m(R_{OA} + R_k), \end{cases} \quad (12)$$

После решения системы уравнений (12) получим значения постоянных:

$$C_1 = \frac{-2\pi m(R_{OA} + R_k)}{[1 - \exp 0,5B_k / (R_{OA} + R_k)]^2}, \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{-2\pi m[(R_{OA} + R_k) \cdot \exp B_k / (R_{OA} + R_k)]}{[1 - \exp 0,5B_k / (R_{OA} + R_k)]}, \quad (14)$$

$$C = \frac{-2\pi m\mu[(1 + R_{OA}B_k)]}{(R_{OA} + R_k)[1 - \exp 0,5B_k / (R_{OA} + R_k)]}. \quad (15)$$

С учётом полученных значений C_1 , C_2 и C уравнение для определения значений скорости

сдвиговых деформаций слоя по ширине камеры B_k примет вид:

$$v_\phi = \frac{2\pi m \left[(R_{OA} + R_k) \cdot \left(1 + \exp \frac{B_k}{R_{OA} + R_k} + \exp \frac{(B_k - B_{k,i})}{R_{OA} + R_k} \right) \right]}{[1 - \exp \frac{0,5B_k}{(R_{OA} + R_k)}]^2}. \quad (16)$$

Анализ уравнения показывает, что скорость сдвиговых деформаций (v_ϕ) слоя гранул по ширине камеры изменяется по параболическому закону с наибольшим значением в центральной части камеры.

С целью проверки и уточнения результатов теоретических исследований было проведено физическое моделирование процесса гранулирования. Для этого был использован вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия [14, 15]. Конструктивно агрегат представляет собой базовый кривошипно-ползунный механизм с автоматизированным управлением (рис. 2). Он может быть оснащён двумя или тремя камерами, которые позволяют добиться выполнения различных технологических операций в одной машине за счёт конструктивных особенностей и организации технологического процесса. Например, дезагломерации волокнистых материалов, классификации, гомогенизации, получения гранул из композиционных смесей и другие.

Механизм работает следующим образом: электродвигатель 1, через клиноременную 2 и зубчатую 3 передачи, передает вращение эксцентриковым валам 4 с противовесами 5. При этом подвижная рама 13 соединена с

эксцентриковыми валами, ползунами 14 и рабочими камерами 9, 10, 11. Таким образом, в результате вращения эксцентриковых валов каждая из закреплённых на подвижной раме рабочих камер совершает движение по заданной траектории (верхняя – возвратно-поступательное, средняя – по эллипсоидной траектории, нижняя – по круговой траектории). В тоже время при возвратно-поступательном движении рамы осуществляется вибрация желобов 8.

Для предварительной подготовки материала, конструкция может быть оснащена валковым уплотнителем 7 с собственным приводом 6.

Кроме того, для подготовки и переработки волокнистого материала способом дезагломерации верхняя камера может быть выполнена призматической формы, а внутри нее закреплены гирляндные цепные завесы. Тогда нижняя из двух камер будет составлена из двух дополнительных устройств 12 с загрузочными и выгрузочными устройствами.

Для получения фиброполнителей, например, в виде микрогранул может быть предусмотрена дополнительная камера, которая соединена

с нижней камерой и оснащена центральным загрузочным отверстием и с двух сторон двумя крайними выгрузочными отверстиями. Внутри она содержит по своему периметру вставки в

виде усеченных конусов, направленных большими основаниями от загрузки по центру в стороны к выгрузке.

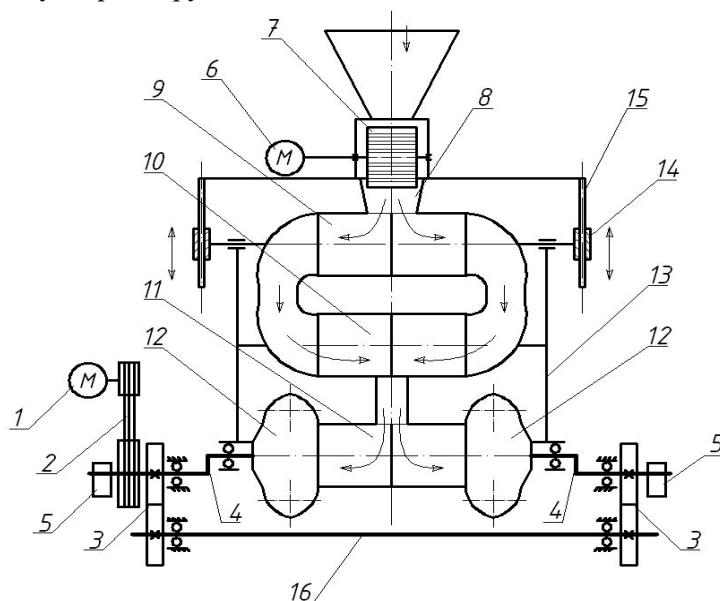


Рис. 2. Конструкция вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия:

1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – зубчатая передача; 4 – эксцентриковый вал; 5 – противовесы; 6 – привод вала; 7 – валок; 8 – виброжелоба; 9, 10 и 11 – рабочие камеры; 12 – дополнительные устройства; 13 – подвижная рама; 14 – ползуны; 15 – стойки; 16 – промежуточный вал

Моделирование осуществлялось в нижней цилиндрической камере гранулирования с прозрачной торцевой крышкой (рис. 3), который

жестко соединен с подвижной рамой, закрепленной в подшипниковых узлах на двух эксцентриковых валах, соединенных с приводом.

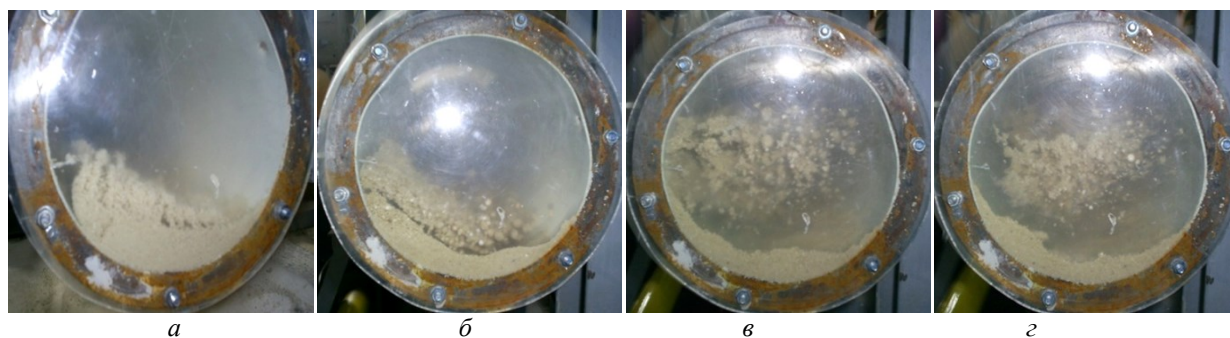


Рис. 3. Движение материала в камере агломерации:

а, б) при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 200 - 250$ об/мин;
в, г) при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 300 - 350$ об/мин

Установлено, что при движении камеры по круговой траектории без вращения вокруг собственной оси для находящегося в нем гранулируемого материала характерен: циркуляционный режим движения материала при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 200 \dots 250$ об/мин (рис. 3, а, б); водопадно-каскадный – при $n = 300 \dots 350$ об/мин (рис. 3, в, г).

Для проведения моделирования и получения гранул были использованы смеси следующего состава:

1. в пропорции по весу: песок – 30 %, цемент – 40 %, перлит – 20 %, бентонит – 2 %, базальтовое фиброволокно – 6-8 %, при влагосодержании – 0,6;
2. связующее – меласса; $C_{св} = 15$ % на 100 г материала;
3. связующее – 5 % КМЦ; $C_{св} = 10$ % на 100 г материала.

Эксперимент показал, что гранулы (рис. 4), полученные при окатывании в нижней цилиндрической камере, особенно на начальной стадии гранулообразования (микрогранулирования), имеют более выраженную эллипсовидную

форму. Следует отметить, что получение сферообразных гранул в этом случае возможно, но это негативно сказывается на производительности,

так как время пребывания гранулята внутри камеры увеличивается.

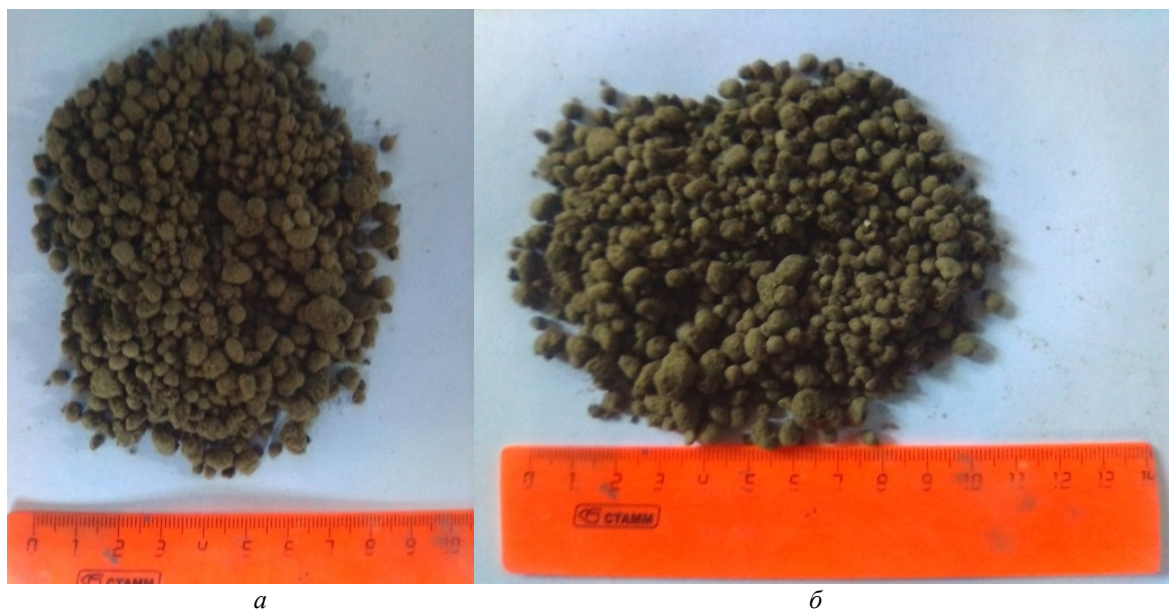


Рис. 4. Общий вид гранул:
 а) связующее – меласса, $C_{св} = 15\%$ на 100 гр. материала;
 б) связующее – 5% КМЦ, $C_{св} = 10\%$ на 100 гр. Материала

Также при проведении комплекса экспериментов по получению композиционных смесей со сформованными базальтовыми фиброволокнами и испытания полученных из них спрессованных образцов установлено, что при увеличении процентного содержания волокон в смеси (6–8 %), наблюдается повышение прочности на сжатие с $\sigma_{сж} = 0,45$ МПа до $\sigma_{сж} = 0,55$ МПа. При этом снижается плотность с $\rho = 400$ кг/м³ до $\rho = 350$ кг/м³ и теплопроводность с $\lambda = 0,018$ Вт/(м·К) до $\lambda = 0,013$ Вт/(м·К).

Все это, в свою очередь, свидетельствует о целесообразности создания условий для гранулирования с более равномерным изменением значений скоростей сдвиговых деформаций по ширине рабочих камер путем конструктивно-технологического совершенствования геометрического профиля этих камер, их внутренних устройств, а также организации самого процесса гранулообразования.

Одним из вариантов технического решения данной задачи (создания благоприятных условий гранулирования) является использование тороидального или близкого к нему профиля камеры гранулирования. Это позволит добиться улучшения качества продукции, например, при переработке техногенных материалов (базальто-волоконистых, целлюлозно-бумажных и других отходов производств) с получением фибронаполнителей в виде отдельных фибр или высококонцентриро-

ванных сферообразных микрогранул. В последнем случае, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, положительный эффект будет достигнут за счет более интенсивного перемещения частиц материала в пространстве по направлению координат XYZ.

Выводы. Проведенные аналитические исследования скорости распределения слоя материала по ширине камеры гранулирования позволили выявить неравномерность распределения потока, что указывает на ограничение степени свободы находящихся в ней частиц. Более благоприятные условия для реализации процессов агломерации возможно создать за счет интенсивного объемно-пространственного перемещения материала, что также оказывает положительное влияние на течение процесса гранулирования. При этом окатывающее воздействие на материал осуществляется в результате перемещения частиц в пространстве по направлению координат XYZ, а образующиеся центры гранулообразования (микрогранулы) являются основой для последующего гранулообразования. Данный технологический процесс может быть реализован на последней стадии агломерации (то есть получении конечных гранул) при использовании тороидального или близкого к нему профиля камеры гранулирования. На практике результаты исследований применены при разработке конструкций машин для комплексной переработки сырьевых и техногенных материалов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализуемого проекта НОЦ «Инновационные решения в АПК» № 10089447 (2020-2022 гг.) научно-производственной платформы «Рациональное природопользование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные системы в производстве строительных материалов. М.: Изд-во ВНИИЭСМ, 1994. 297 с.
2. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. 229 с.
3. Keleb E.I., Vermeire A., Vervaeke C., Remon J. P. Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2004. Том. 273. №1-2. Pp. 183–194. doi: 10.1016/j.ijpharm.2004.01.001.
4. Makarenkov D.A., Volkov P.A., Nazarov V.I. Design of enzyme granulation processes // *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Том. 85. № 10. Pp. 2465–2475. doi: 10.1134/S1070363215100424.
5. Yegorov B.V., Batietskaya N.O., Fedoryaka V.P. Application of granulation technology in various industries // *Grain products and mixed fodders*. 2017. Том. 17. №3. Pp. 33–38.
6. Bansal A.K., Balwani G., Sheokand S. Critical material attributes in wet granulation // *Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation: Theory and Practice in a Quality by Design Paradigm*. 2018. Pp. 421–453. doi: 10.1016/B978-0-12-810460-6.00009-9.
7. Iveson S. M., Litster J. D., Hapgood K., Ennis B. J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review // *Powder Technology*. 2001. Том. 117. № 1-2. Pp. 3–39. doi: 10.1016/S0032-5910(01)00313-8.
8. Simons S.J.R., Rossetti D., Paglia P. The relationship between surface properties and binder performance in granulation // *Chemical Engineering Science*. 2005. Том. 60. № 14. Pp. 4055–4060. doi: 10.1016/j.ces.2005.02.034.
9. Kelbaliyev G.I., Samedli V.M., Samedov M.M. Regularities of formation of granules at granulation of powdered materials in drum devices // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2018. № 3. Pp. 57–65. doi: 10.32737/0005-2531-2018-3-57-65.
10. Dubinin N.N., Evtushenko E.I., Nemets I.I., Nosov O.A., Osokin A.V. Rotary machines for production of ceramic wall materials // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Том. 8. № 13. Pp. 201–206.
11. Севостьянов М.В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. 205 с.
12. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Sevostyanov V.S., Emel'yanov D.A. Methodological Principles of Agglomeration Processes Improvement in Technologies of Disperse Materials Processing // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Том. 9. № 11. Pp. 738–744. DOI: 10.3923/rjasci.2014.738.744.
13. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. 569 с.
14. Пат. 2412753, Российская Федерация, МПК В01J 2/00. Вибрационно-центробежный гранулятор / Т. Н. Ильина, М. В. Севостьянов, Е. А. Шкарпеткин, В. И. Уральский; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2009135800/05: заявл. 25.09.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. №6. 8 с.
15. Пат. 2692624, Российская Федерация, МПК В02С 17/08. Устройство и способ переработки техногенных волокнистых материалов для получения фиброполнителей (варианты) / М. В. Севостьянов, В. А. Полуэктова, В. С. Севостьянов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2018131819: заявл. 03.09.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. №18. 9 с.

Информация об авторах

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: tkmm_bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шкарпеткин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: jonick86@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Севостьянов Максим Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: msev31@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бабуков Владимир Александрович, аспирант кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: babukov-v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.03.2022 г.

© Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А., 2022

Sevostyanov V.S., *Shkarpetkin E.A., Sevostyanov M.V., Babukov V.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

STUDY OF THE CONDITIONS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE GRANULE CHAMBER

Abstract. *The article substantiates the need for scientific and technical developments, theoretical and experimental studies of the processes of agglomeration of powdery, viscous-plastic materials, as well as materials of an anisotropic structure to obtain molded bodies of a given granulometry in order to improve their consumer properties. A mathematical model is presented. It describes the conditions of material movement in the granulation chamber, which is presented as a system of differential equations for the movement of a viscous incompressible fluid in a cylindrical coordinate system. The results of the theoretical studies carried out are confirmed by physical modeling of the technological process of granulation. According to the study of the conditions of movement of the material in the granulation chamber, it is concluded that the rate of shear deformations of the material layer across the width of the chamber varies unevenly, that is, the degree of freedom of the particles in it is limited. A solution is proposed to eliminate this disadvantage by creating more favorable conditions for the implementation of granulation processes, which can be created in a toroidal or close to it in shape chamber due to the intensification of the volumetric and spatial movement of the material.*

Keywords: *processing, technogenic materials, granulation, mathematical model, material movement, shear strain rate, process modeling.*

REFERENCES

1. Sulimenko L.M., Albats B.S. Agglomeration systems in the production of building materials [Aglomeracionnye sistemy v proizvodstve stroitel'nykh materialov]. M.: Publishing House VNIIESM, 1994. 297 p. (rus)
2. Ilyina T.N. Agglomeration processes in technologies for processing dispersed materials: monograph [Processy aglomeracii v tekhnologiyah pererabotki dispersnykh materialov: monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 229 p. (rus)
3. Keleb E.I., Vermeire A., Vervaeke C., Remon J.P. Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2004. Vol. 273. No. 1-2. Pp. 183–194. doi: 10.1016/j.ijpharm.2004.01.001.
4. Makarenkov D.A., Volkov P.A., Nazarov V.I. Design of enzyme granulation processes. *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85. No. 10. Pp. 2465–2475. doi: 10.1134/S1070363215100424.
5. Yegorov B.V., Batievskaya N.O., Fedoryaka V.P. Application of granulation technology in various industries. *Grain products and mixed fodders*. 2017. Vol. 17. No. 3. Pp. 33–38.
6. Bansal A.K., Balwani G., Sheokand S. Critical material attributes in wet granulation. *Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation: Theory and Practice in a Quality by Design Paradigm*, 2018. Pp. 421–453. doi: 10.1016/B978-0-12-810460-6.00009-9.
7. Iveson S.M., Litster J.D., Hapgood K., Ennis B.J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. *Powder Technology*. 2001. Vol. 117. No. 1-2. Pp. 3–39. doi: 10.1016/S0032-5910(01)00313-8.
8. Simons S. J. R., Rossetti D., Pagliai P. The relationship between surface properties and binder performance in granulation. *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60. No. 14. Pp. 4055–4060. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.034.
9. Kelbaliyev G.I., Samedli V.M., Samedov M.M. Regularities of formation of granules at granulation of powdered materials in drum devices. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2018. No. 3. Pp. 57–65. doi: 10.32737/0005-2531-2018-3-57-65.
10. Dubinin N.N., Evtushenko E.I., Nemets I.I., Nosov O.A., Osokin A.V. Rotary machines for production of ceramic wall materials. *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8. No. 13. Pp. 201–206.
11. Sevostyanov M.V. Calculation and design of equipment for compaction of technogenic materials: monograph [Raschet i proektirovanie oborudovaniya dlya kompaktirovaniya tekhnogennykh materialov: monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2017. 205 p. (rus)

12. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Sevostyanov V.S., Emel'yanov D.A. Methodological Principles of Agglomeration Processes Improvement in Technologies of Disperse Materials Processing. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No 11. Pp. 738–744. doi: 10.3923/rjasci.2014.738.744.

13. Il'ina T.N., Sevostyanov M.V., Shkarpetkin E.A., Uralskiy V.I. Vibratory-centrifugal granulator. Patent RF, no 2412753 (2009135800/05), 2011.

14. Sevostyanov M.V., Poluektova V.A., Sevostyanov V.S. Device and method for processing technogenic fibrous materials to obtain fiber fillers (options). Patent RF, no 2692624, 2019.

15. Olkhovsky I.I. Course of theoretical mechanics for physicists. 2nd ed., revised. and additional [Kurs teoreticheskoy mekhaniki dlya fizikov. 2-e izd., pererab. i dop.] M.: Publishing House of Moscow University, 1974. 569 p. (rus)

Information about the authors

Sevostyanov, Vladimir S. DSc, Professor. E-mail: tkmm_bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shkarpetkin, Evgenij A. PhD. E-mail: jonick86@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sevostyanov, Maksim V. DSc, Assistant professor. E-mail: msev31@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Babukov, Vladimir A. Postgraduate student. E-mail: babukov-v@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.03.2022

Для цитирования:

Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А. Исследование условий движения материала в камере гранулирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107

For citation:

Sevostyanov V.S., Shkarpetkin E.A., Sevostyanov M.V., Babukov V.A. Study of the conditions of material movement in the granule chamber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-108-115

Францкевич В.С., *Гребенчук П.С., Минченко П.А.
Белорусский государственный технологический университет
*E-mail: p_grebenchuk@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ШЛИКЕРНОГО АТОМИЗАТОРА

Аннотация. В статье определена область применения распылителей жидкости в современных технологиях. Описан механизм образования капель из струи жидкости и параметры среды, влияющие на размер этих капель. Охарактеризованы основные требования к форсункам и другим распылителям, используемым в распылительных сушилках. Установлено, что важнейшими характеристиками их работы являются равномерность распыла и дисперсность капель. Предложена методика расчета эффективности распыления на основании опытных данных с помощью коэффициента неравномерности орошения. Описаны методы оценки дисперсности и распределения капель, получаемых в форсунке. Предложена модернизированная конструкция форсунки с завихрителем и распределителем для использования в шликерных атомизаторах для получения пресс-порошка. Проведены сравнительные исследования данной форсунки с целью оценки равномерности ее распыла и дисперсности капель по вышеуказанным методикам. Представлены фотографии результатов распыления по двум предложенным методикам. Анализ результатов исследований показал, что по основным своим рабочим характеристикам модернизированная форсунка имеет существенное преимущество в сравнении с традиционными конструкциями. Это позволяет говорить о перспективах ее использования в распылительных сушилках, в частности, при получении керамического пресс-порошка высокого качества.

Ключевые слова: сушилка распылительная, шликер, форсунка, равномерность распыления, завихритель, капля, дисперсность.

Введение. Распыление жидкостей используется в промышленности при сжигании топлива, сушке, мокрой очистке газов и других процессах. Технически его можно осуществлять с помощью форсунок или быстровращающихся дисков, причем в современных производствах первый способ получил более широкое распространение. Разделение потока жидкости на капли происходит на выходе из форсунки в зоне высокой турбулентности. Размер полученных капель зависит от плотности среды, скорости струи, геометрических параметров распыляющего устройства, вязкости, плотности и поверхностного натяжения жидкости [1, 2].

Правильный выбор конструкции распылителя имеет важное значение для надежной и эффективной работы аппаратов. На сегодняшний день существует широкое разнообразие вариантов конструкций форсунок, однако лишь несколько из них получили широкое распространение в промышленности [3–6].

В последние десятилетия значительно возрастают мощности предприятий, создаются новые высокотехнологичные методы производств, которые обеспечивают интенсификацию процесса и повышение качества продукции. В связи с этим существенно повысились требования к пределам регулирования расхода единичных форсунок и к качеству распыления, что стимулировало создание новых, более совершенных конструкций.

Шликерные атомизаторы или распылительные сушилки предназначены для удаления влаги и получения готовой продукции в виде тонкодисперсного порошка. В промышленности строительных материалов эти аппараты применяются для получения из суспензии порошка для прессования плитки.

В настоящее время при производстве керамической плитки используются атомизаторы нескольких типов, одним из отличий которых является использование центробежных распылителей (форсунок), с различными завихрителями [7, 8]. В процессе эксплуатации некоторых из них был выявлен ряд проблем. В первую очередь это проявилось в низком качестве получаемого пресс-порошка, заключающемся в несоответствии частиц требуемым размерам. Кроме того, зачастую наблюдалось налипание суспензии на элементах сушилки и выпадение крупных агломератов вследствие неравномерности распыления. Поэтому было предложено провести комплексный анализ качества распыления суспензии основных разновидностей центробежных форсунок, используемых при получении керамического пресс-порошка, наряду с новой, более эффективной форсункой с завихрителем.

Материалы и методы. В первую очередь были проведены исследования по определению распылительной способности (равномерности распыла) форсунок на трех расходах. Установка для изучения производительности форсунок и

исследования равномерности распыла жидкости представлена на рис. 1.

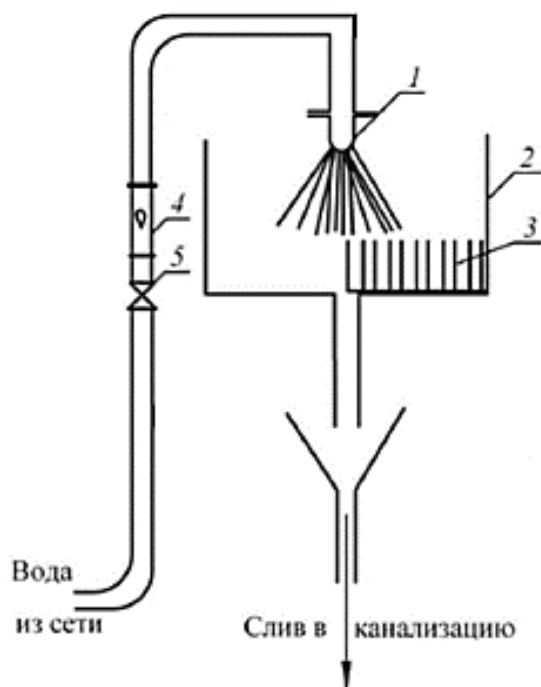


Рис. 1. Схема установки для исследования форсунок
1 – трубопровод с исследуемой форсункой;
2 – рабочая ёмкость; 3 – блок мерных цилиндров;
4 – ротаметр; 5 – вентиль

Для определения расхода воды через ротаметр на установке имеется тарифовочный график. Блок мерных цилиндров представляет собой кассету, в которую вертикально установлены металлические цилиндры. В ее верхней части имеется общая крышка с рычагом, что позволяет быстро закрывать и открывать одновременно все цилиндры. С целью предотвращения уноса брызг из рабочей емкости и удобства работы на установке вокруг рабочей емкости установлена обечайка из оргстекла.

Для оценки эффективности распыления на основании опытных данных рассчитывался коэффициент неравномерности орошения [9, 10]:

$$K = \frac{100}{V_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{\text{ср}})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ср}}$ – среднее количество жидкости в цилиндре, мл; V_i – количество жидкости в i -м цилиндре, мл; n – число цилиндров. Как видно из (1), для лучшего распыления K должен стремиться к 1.

Далее оценивали дисперсность полученных капель с помощью метода улавливания капель в жидкость и метода отпечатков [10–13].

Первый этап подразумевал собой улавливание капель на более вязкой жидкости, которая не смешивается с исследуемой и не растворяется в

ней («Литол-24»). Тонкий слой смазки наносится на прозрачную пластинку из оргстекла. Далее пластина опускается на определенный уровень так, чтобы капли попали на нее. Попавшие на слой смазки капли измеряют под микроскопом. На каждом расходе опыт повторяется по три раза с занесением данных в таблицу.

Вторая часть эксперимента заключалась в улавливании капель на металлической пластинке, которая была покрыта сажой. Она находилась в прозрачной трубе, в которой по горизонтали с одинаковым интервалом сделаны одинаковые отверстия. Исследования проводились на трех расходах, таких же, как и в первом опыте. Капли воды попадали на пластину за счет проворачивания трубы. После пластина извлекалась и размер капель также рассматривался под микроскопом.

Этот метод является одним из простейших, однако возникает вопрос о том, не происходит ли при ударе капли о слой сажи столь сильной деформации, что измеренный отпечаток капли не соответствует истинному ее диаметру. Экспериментально установлено [10], что для капель диаметром 200 мкм и выше толщина слоя сажи должна быть приблизительно 0,3–0,5 мм. В этом случае относительная погрешность измерения диаметра капли составит 2–3 %.

Основная часть. Механические центробежные форсунки являются наиболее распространенными устройствами для распыления жидкостей. Основным элементом этих форсунок является завихритель, в котором жидкость, проходя через тангенциальные каналы, приобретает вращение и таким образом образуется закрученный поток. На выходе из сопла поток дробится на капли и приобретает коническую форму либо с распределением капель вдоль образующей конуса, либо со сплошным распределением капель по всему его объему [7–9].

Давление жидкости на выходе из сопла составляет 0,3–2 МПа. Этот параметр зависит в основном от требуемой дисперсности распыла (размера капель), физических свойств жидкости и размеров самой форсунки. Последние, в свою очередь, определяются производительностью установки.

В пневматических форсунках используется кинетическая энергия высокоскоростного энергоносителя (газа или пара) [11, 14]. Условно их разделяют на форсунки низкого и высокого давления: с избыточным давлением распыливающего агента до 10 кПа и от 100 до 1000 кПа соответственно.

Очевидно, что энергозатраты пневматических форсунок выше, чем у механических при

той же производительности. Однако первые позволяют получать большую дисперсность капель и используются для сжигания мазута, при увлажнении и охлаждении газового потока.

В качестве объектов исследования были выбраны три механические форсунки: с плоским распылителем (рис. 2, а), с винтовым распылителем (рис. 2, б) и модернизированная форсунка с завихрителем (рис. 3).

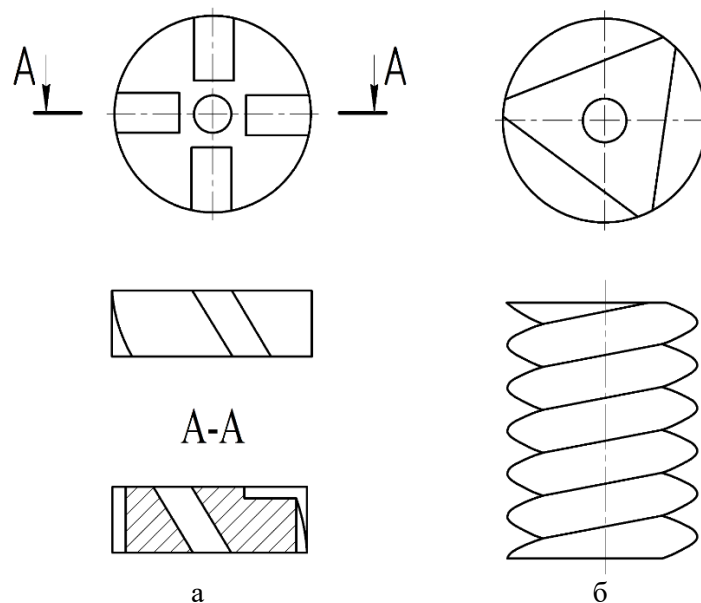


Рис. 2. Варианты распылителей исследуемых форсунок
а) плоский; б) винтовой

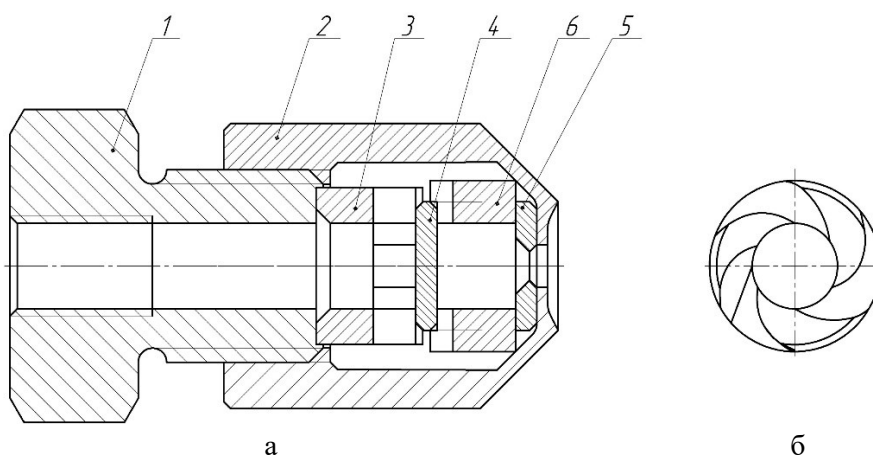


Рис. 3. Модернизированная форсунка с завихрителем
а) форсунка в разрезе; б) вид слева завихрителя

1 – штуцер; 2 – корпус; 3 – распределитель; 4 – пластина; 5 – концентратор; 6 – завихритель

в исследуемой новой конструкции форсунки поток жидкости сначала распределяется по сечению более равномерно с помощью распределителя 3, затем глухая пластина 4 направляет поток к тангенциальным входам завихрителя 6. Концентратор 5 собирает полученную взвесь по оси устройства для распыления. Таким образом, данный вариант форсунки имеет более сложную конструкцию по сравнению с традиционно используемыми, но позволяет достичь большего качества распыления.

Для оценки равномерности орошения было выбрано пять форсуночных распылителей: по 2

типоразмера плоского и винтового и модернизированная конструкция. Исследования проводили на трех расходах жидкости Q : 357 кг/ч, 378 кг/ч и 400 кг/ч. На каждом расходе опыт повторяли по три раза и данные заносили в сводную таблицу. Затем определялось среднее значение V_i для каждого мерного цилиндра по результатам трех опытов. После рассчитывался коэффициент неравномерности орошения K для каждой форсунки по формуле (1).

Здесь приведем результаты исследований для модернизированной форсунки (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследования равномерности распыла модернизированной форсунки

№ п/п	V_i при $Q = 357$ кг/ч, мл	V_i при $Q = 378$ кг/ч, мл	V_i при $Q = 400$ кг/ч, мл	V_i среднее, мл	Отклонение от $V_{ср}$, %
1	2,8	3,5	3	3,1	99,7
2	2,9	3	3,4	3,1	99,7
3	3,8	3	3,8	3,5	112,5
4	4	4,8	4,4	4,4	141,5
5	3,9	4,8	4,5	4,5	144,7
6	1,6	2,5	2,2	2,2	70,7
7	0,8	2,5	1	1	32,2

При полученном $V_{ср}=7,18$ мл коэффициент неравномерности орошения составил $K=108$.

Для других исследованных форсунок коэффициент K колебался значительно и находился в пределах от 164 для форсунки с винтовым распылителем и диаметром центрального отверстия 2 мм до 350 для форсунки с плоским распылителем и диаметром центрального отверстия 3 мм. Как видно, с точки зрения равномерности орошения предлагаемая новая форсунка показала наилучшие результаты.

Отметим, что равномерность орошения особенно важна для форсунок с образованием крупных капель, поскольку, будучи неравномерно расположенными, они могут объединяться и выпадать из потока, нарушая технологический процесс и понижая качество продукта на выходе [11, 12].

Далее были проведены исследования качества распыления двумя указанными выше методами. Следует отметить, что для любого процесса дисперсность распыляемых капель является не менее важным показателем, чем равномерность распыла. Для распыления суспензии в

атомизаторах, в отличие от сжигания топлива, размер капель должен быть приближен к 1 мм, а излишне тонкие капли (менее 0,1 мм) негативно сказываются на качестве пресс-порошка [7, 15].

Целью исследований было установить количество полученных капель в каждой форсунке и их размер. Опыты проводились для тех же трех расходов что и предыдущий и количество капель росло пропорционально расходу. Поэтому здесь представлены данные для наибольшего расхода, равного 400 кг/ч. Так же, как и в предыдущем опыте, измерения повторялись по 3 раза для каждого случая и среднее значение заносилось в таблицу.

В табл. 2 представлены результаты исследования методом улавливания капель в жидкость. В учет здесь взят участок, который попадает в объектив микроскопа размером 1,6×1,6 см. Среднее значение количества капель округлялось до целого. Количество капель размером 0,1 мм и менее оценивалось приблизительно из-за большого их количества и сложности визуального подсчета.

Таблица 2

Результаты исследований дисперсности капель методом улавливания в жидкость для модернизированной форсунки

Размер капель, мм	Количество капель			Среднее количество капель	Суммарное количество капель
	1 опыт	2 опыт	3 опыт		
3	–	1	–	1	3
2	14	10	13	12	37
1	10	7	12	10	29
0,5	5	7	3	5	15
0,1	>10	>10	>10	–	–

Для сравнения в табл. 3 представлены данные исследований тем же методом для форсунки с винтовым распылителем и диаметром центрального отверстия 2 мм, показавшей самые близкие результаты к исследуемой в опыте по равномерности орошения.

Наблюдаем, насколько ниже эффективность распыления у винтовой форсунки по сравнению

с исследуемой. Количество капель в несколько раз меньше, а их размер смещен в сторону 0,1 мм и менее.

Далее рассмотрим результаты исследования качества распыления методом отпечатков. Установка для исследований была сконструирована согласно методике [10, 12] и изображена на рис. 2.

Таблица 3

**Результаты исследований дисперсности капель методом улавливания в жидкость
для винтовой форсунки**

Размер капель, мм	Количество капель			Среднее количество капель	Суммарное количе- ство капель
	1 опыт	2 опыт	3 опыт		
2	3	4	3	3	10
1	4	2	3	3	9
0,5	2	1	1	1	4
0,1	>10	>10	>10	–	–

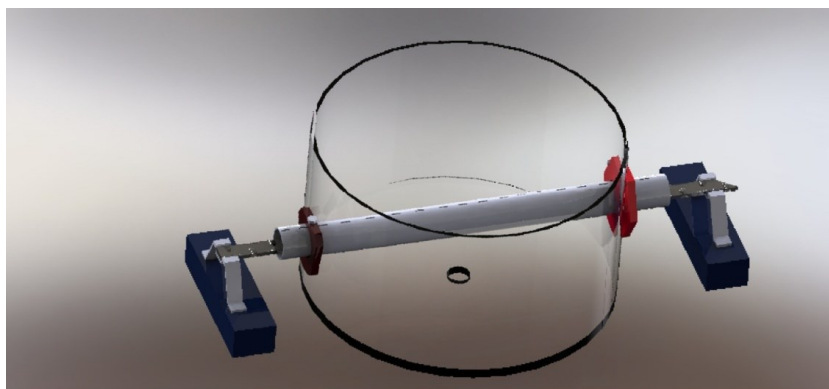


Рис. 4. Установка для реализации метода отпечатков

В табл. 4 представлены результаты исследований эффективности распыления модернизированной форсунки.

Для сравнения в табл. 5 представлены данные исследований тем же методом для форсунки с винтовым распылителем и диаметром центрального отверстия 2 мм.

Таблица 4

**Результаты исследований дисперсности капель методом отпечатков
для модернизированной форсунки**

Размер капель, мм	Количество капель			Среднее количество капель	Суммарное количе- ство капель
	1 опыт	2 опыт	3 опыт		
3	1	3	2	2	6
2	7	6	6	6	19
1	5	4	4	4	13
0,1	7	4	4	5	15

Таблица 5

**Результаты исследований дисперсности капель методом отпечатков
для винтовой форсунки**

Размер капель, мм	Количество капель			Среднее количество капель	Суммарное количе- ство капель
	1 опыт	2 опыт	3 опыт		
1,5	4	4	3	4	11
1	4	3	3	3	10
0,5	3	4	3	3	10
0,1	6	7	6	6	19

Здесь тенденция предыдущего опыта сохраняется, хоть и менее выраженная: Суммарное количество капель больше для модернизированной форсунки, а размеры их крупнее.

Также следует отметить значительное уменьшение количества уловленных пластиной капель наименьшего размера (0,1 мм и менее), как и уменьшение количества уловленных капель для модернизированной форсунки в целом.

Поскольку условия эксперимента были теми же, можно сделать вывод, что для данных опытов удерживающая способность вязкой среды выше, чем сажи. Однако второй метод дает более четкие отпечатки и позволяет лучше оценить размеры капель.

Ниже представлены увеличенные фотографии результатов распыления: после применения

метода улавливания в жидкость для модернизированной форсунки с завихрителем и для фор-

сунки с винтовым распылителем (рис. 5, а и б соответственно), а также после применения метода отпечатков (рис. 5, в).

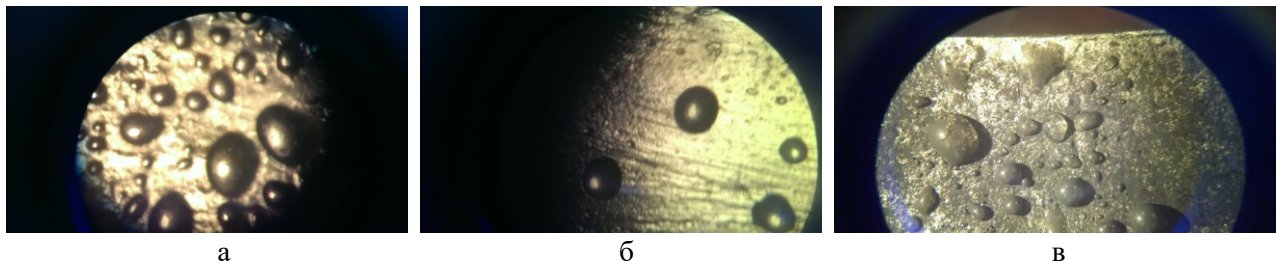


Рис. 5. Фотографии результатов распыления
а – метод улавливания в жидкость, модернизированная форсунка;
б – метод улавливания в жидкость, винтовая форсунка; в – метод отпечатков

Фотографии подтверждают результаты исследований: видно, насколько большее количество капель образуется в модернизированной конструкции. Также заметно, что при попадании на сажу капли имеют более четкую границу, о чем упоминалось выше.

Выводы.

1. Предложена модернизированная конструкция форсунки с завихрителем для использования в башенных распылительных сушилках.

2. Установлено, что использование модернизированной форсунки позволяет достичь более равномерного распределения капель по радиусу в сравнении с базовыми образцами. Удалось получить коэффициент неравномерности орошения $K=108$, что является прекрасным показателем.

3. Показано, что модернизированная форсунка с завихрителем позволяет получить большее количество капель в требуемом для распылительных сушилок диапазоне размеров в 1,5 – 3 раза в зависимости от метода исследований.

4. Таким образом, исследуемая форсунка с завихрителем может быть эффективно использована в башенных распылительных сушилках для получения пресс-порошка в производстве керамической плитки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс. 2004. 751 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2ч. М.: Химия, 2002. Ч. 2: Массообменные процессы и аппараты. 368 с.
3. Силенок С.Г., Борщевский А.А., Горбовец М.Н., Мелия Г.С., Туренко А.В., Элер Е.А.

Механическое оборудование предприятий строительных материалов изделий и конструкций: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.

4. Ильевич А.П. Машины и оборудование для заводов по производству керамики и огнеупоров. М.: Машиностроение, 1979. 355 с.
5. Булавин И.А. Машины и автоматические линии для производства тонкой керамики. М.: Машиностроение, 1979. 325 с.
6. Севостьянов В.С., Богданов В.С., Дубинин Н.Н., Уральский В.И. Механическое оборудование производства тугоплавких неметаллических и силикатных материалов и изделий. М.: ИНФА-М, 2014. 432 с.
7. Белопольский М.С. Сушка керамических суспензий в распылительных сушилках. М.: Машиностроение, 1972. 284 с.
8. Пажи Д.Г., Корягин А.А., Ламм Э.Л. Распыливающие устройства в химической промышленности. М.: Химия, 1975. 375 с.
9. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высш. шк., 1979. 439 с.
10. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
11. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 432 с.
12. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. – 206 с.
13. Михалева Т.В. Методологическое обоснование агрегата и процесса распылительной сушки в нестационарных аэродинамических потоках: дис. кандидат технических наук: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям). Оренбург, 2013. 161 с.
14. Левданский Э.И. Расчет промышленных установок для сушки сыпучих и кусковых материалов. Минск, БГТУ, 1992. 83 с.
15. Ермилов П.И. Диспергирование пигментов: Учебник для строительных вузов. М.: Машиностроение, 1971. 300 с.

Информация об авторах

Францкевич Виталий Станиславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: fvs2@tut.by. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а.

Гребенчук Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: p_grebenchuk@mail.ru. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а.

Минченко Павел Александрович, студент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а.

Поступила 27.05.2022 г.

© Францкевич В.С., Гребенчук П.С., Минченко П.А., 2022

Franckevich V.S., *Grebenchuk P.S., Minchenko P.A.

Belorussian State Technological University

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

INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL INJECTORS SLIP ATOMIZER

Abstract. The article defines the scope of liquid sprayers in modern technologies. The mechanism of formation of drops from a liquid jet and the parameters of the medium that affect the size of these drops are described. The basic requirements for nozzles and other sprayers used in spray dryers are characterized. It has been established that the most important characteristics of their work are the uniformity of the spray and the dispersion of the drops. A technique for calculating the efficiency of spraying based on experimental data using the irrigation non-uniformity coefficient is proposed. Methods for estimating the dispersion and distribution of droplets produced in a nozzle are described. A modernized design of the nozzle with a swirler and a distributor for use in slip atomizers to produce press powder is proposed. Comparative studies of this nozzle are carried out in order to assess the uniformity of its spray and the dispersion of drops according to the above methods. Photographs of the results of spraying by two proposed methods are presented. Analysis of the research results shows that the modernized nozzle has a significant advantage in comparison with traditional designs in terms of its main performance characteristics. This provides the prospects for its use in spray dryers, in particular, in the production of high quality ceramic press powder.

Keywords: spray dryer, slip, nozzle, spray uniformity, swirl, drop, dispersion.

REFERENCES

1. Kasatkin A.G. Basic processes and apparatuses of chemical technology [Osnovnie proceccy i apparaty himicheskoi tehnologii]. M.: Alliance. 2004. 751 p. (rus)
2. Dytnersky Y.I. Processes and apparatuses of chemical technology [Proceccy i apparaty himicheskoi tehnologii] : in 2p. M.: Chemistry, 2002. P. 2: Mass transfer processes and apparatuses [Massoobmennye proceccy i apparaty]. 368 p. (rus)
3. Silenok S.G, Borshchevsky A.A., Gorbovets M.N., Meliya G.S., Turenko A.V., Eler E.A. Mechanical equipment of enterprises of building materials products and structures: textbook for universities [Mehanicheskoe oborydovanie predpriyatij stroitelnykh materialov i izdeliy: ychebnik dlya vyzov]. M.: Mechanical Engineering, 1990. 416 p. (rus)
4. Ilevich A.P. Machinery and equipment for factories for the production of ceramics and refractories [Mashiny i oborydovanie dlya zavodov po proizvodstvu keramiki i огнеупоров]. M.: Mechanical Engineering, 1979. 355 p. (rus)
5. Bylavin I.A. Machines and automatic lines for the production of fine ceramics [Mashiny i avtomaticheskie linii dlya proizvodstva tonkoi keramiki]. M.: Mechanical Engineering, 1979. 325 p. (rus)
6. Sevastianov V.S., Bogdanov V.S., Dubinin N.N., Uralsky V.I. Mechanical equipment for the production of refractory non-metallic and silicate materials and products [mehanicheskoe oborydovanie dlya proizvodstva tygoplavkikh nemetallicheskih i silikatnykh materialov i izdeliy]. M.: INFA-M, 2014. 432 p. (rus)
7. Belopolski M.S. Drying of ceramic suspensions in spray dryers [Sushka keramicheskikh suspenziy v raspylitselnykh syshilkah]. M.: Mechanical Engineering, 1972. 284 p. (rus)
8. Paji D.G., Kariagin A.A., Lamm E.I. Spraying devices in the chemical industry [raspylivayushchie ustroystva v himicheskoi promyshlennosti]. M.: Chemistry, 1975. 375 p. (rus)
9. Kafarov V.V. Fundamentals of mass transfer [Osnovy massoperechachi]. M.: Higher School, 1979. 439 p. (rus)

10. Sazjin B.S. Fundamentals of drying techniques [Osnovy tekhniki syshki]. M.: Chemistry, 1984. 320 p. (rus)

11. Lykov M.V. Drying in the chemical industry [Sushka v himicheskoi pomyslennosti]. M.: Chemistry, 1970. 432 p. (rus)

12. Frolov V.F. Modeling of drying of dispersed materials [Modelirovanie syshki dispersnykh materialov]. L.: Chemistry, 1987. 206 p. (rus)

13. Mikhaleva T.V. Methodological justification of the unit and the spray drying process in non-stationary aerodynamic flows [Metodologicheskoe obosnovanie agregata i processa raspylitelnoi syshki

v nestatsionarnykh aerodinamicheskikh potokakh]: dis. Candidate of Technical Sciences: 05.02.13 – Machines, units and processes (by industry). Orenburg, 2013. 161 p.

14. Levdanski E.I. Calculation of industrial installations for drying bulk and lump materials [Raschet promyshlennykh ystanovok dlya syshki sipychih i kyskovykh materialov]. Minsk, BSTU, 1992. 83 p. (rus)

15. Ermilov P.I. Dispersion of pigments: Textbook for construction universities [Dispergirovanie pigmentov: Ychebnik dlya stroitelnykh vyzov]. M.: Mechanical Engineering, 1971. 300 p. (rus)

Information about the authors

Franckevich Vitaly S. PhD. E-mail: fvs2@tut.by. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova st., 13a

Grebenchuk Pavel S. PhD. E-mail: p_grebenchuk@mail.ru. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova st., 13a

Minchenko Pavel A. Student. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova st., 13a

Received 27.05.2022

Для цитирования:

Францкевич В.С., Гребенчук П.С., Минченко П.А. Исследование центробежных форсунок шликерного атоизатора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №9. С. 108–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-108-115

For citation:

Franckevich V.S., Grebenchuk P.S., Minchenko P.A. Investigation of centrifugal injectors slip atomizer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 108–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-108-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-116-126

***Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г.**

Оренбургский государственный университет

*E-mail: innanikitina@list.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ДВУСТОРОННИХ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

Аннотация. В работе представлены результаты натурных и вычислительных экспериментов по улучшению тепловых характеристик станка, которые могут привести к уменьшению или достижению симметричности возникающих тепловых деформаций. Рассмотрена реализация четырёх схем перераспределения тепловых потоков: тепловой поток главных электродвигателей, направляемый под защитный кожух приводного шкива, и тепловой поток ремённой передачи выводятся через специальные окна в кожухе в окружающую атмосферу; совместно с первой схемой перераспределения тепловых потоков предусмотрено охлаждение торцов шлифовальных бабок с помощью крыльчатки, закрепленной на каждом приводном шкиве; совместно со второй схемой предусмотрена изоляция теплового потока от левого и правого электродвигателей; нагрев торцов станины станка. Первые три схемы были реализованы на холостом ходу станка, четвёртая схема была реализована при работе станка под тепловой нагрузкой. Совместная реализация 3-х схем позволила снизить перемещение правого круга на холостом ходу в 1,5 раза, левый круг практически не перемещался. Испытание первых трёх схем при работе станка под тепловой нагрузкой существенных изменений в тепловых характеристиках не выявило. Реализация четвёртой схемы перераспределения тепловых потоков позволила компенсировать тепловые деформации от нагрева в центральной части станины и уменьшить изменения углового положения шлифовальных кругов.

Ключевые слова: торцешлифовальные станки, тепловые деформации, температурные перемещения, перераспределение тепловых потоков.

Введение. Современные шлифовальные станки позволяют обеспечивать очень высокие параметры точности. Например, в работе [1] были исследованы параметры шероховатости и формы шлифованной плоской поверхности заготовки из нержавеющей стали AISI [1]. В зависимости от выбора размера зерна шлифовального круга была обеспечена шероховатость поверхности Ra равной 1,92 нм, а отклонение от плоскостности – 1,15 мкм. В работе [2] представлен сверхточный торцешлифовальный станок, разработанный компанией Cranfield Precision, как подразделения Landis Lund, который включает несколько функций автоматического контроля. Это позволило обеспечить достижимые параметры шероховатости плоских поверхностей Ra не менее 10 нм. В Университете Крэнфилда был разработан и изготовлен сверхточный станок BoX для шлифования большой оптики, диаметр зеркала до 2000 мм [3]. Использование систем компенсации ошибок шлифования позволило обеспечить отклонение от плоскостности на длине 1 метр не более 2 мкм. На стабильность шлифования на спроектированном станке BoX, в том числе влияет и обеспечение стабильности температуры масла в шпиндельных гидростатических подшипниках в пределах $\pm 0,1$ °C.

Большое значение для теплового поведения шлифовальных станков имеет температура смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Так в ра-

боте [4] были проведены экспериментальные исследования для зубошлифовального станка. Испытания проводились для трёх режимов работы станка: холостой ход станка с ненагретой СОЖ; холостой ход с нагретой жидкостью и испытание станка под нагрузкой. В ходе испытаний был зафиксирован положительный эффект от нагретой СОЖ. Это позволило предложить модель компенсации температурной погрешности станка на основе мультилинейной регрессии.

Ряд работ исследует не тепловое поведение станка, а тепловые процессы при шлифовании [5–7]. Это позволяет создавать адекватные тепловые модели шлифования на основе энергетического баланса в зоне резания. Позволяет оценить возможные дефекты обработки, обусловленные именно тепловыми процессами в зоне резания. Важность этих исследований связана с нарастающим объёмом исследований в области создания цифровых двойников [8–10].

В [11] представлен метод уменьшения передачи генерируемого в шпиндельных подшипниках тепла шлифовальному кругу за счёт конструкторских решений, изменяющих процесс теплопередачи на основе увеличения теплового контактного сопротивления в шпиндельных опорах.

Важную роль при совершенствовании тепловых характеристик станков играют расчётные или теоретические модели [12, 13]. Прямое изме-

рение температуры в зоне шлифования практически недостижимо из-за большого объёма охлаждающей жидкости и большой зоны взаимодействия заготовки и шлифовального круга. Поэтому в [12] представлена аналитическая модель для оценки температуры шлифования. А в [13] представлена теоретическая модель термической деформации зубошлифовального станка, основанная на теориях: теплового расширения металлических материалов, оси растяжения балки, неравномерного распределения температуры Эйлера-Балка Бернулли и предположении Кирхгофа о плоском сечении.

Теоретические и аналитические модели являются трудоёмкими и являются уникальными. Поэтому гораздо большее распространение в тепловых исследованиях обеспечения точности станков получило конечно-элементное моделирование [14–16]. Использование метода конечных элементов позволяет строить тепловые и термоупругие (иногда используют термин термомеханические) модели, которые используют на разных этапах исследования проблем обеспечения точности обработки на станках и собственно оценки теплового поведения несущей системы станка.

Сегодня исследований по прогнозированию тепловой погрешности шлифовальных станков очень мало и точность прогнозных моделей сравнительно невелика. Поэтому исследователи пытаются применить достаточно популярный в настоящее время подход к построению таких моделей, основанный на нейросетевых алгоритмах. Так в [17] представлен метод прогнозирования,

основанный на использовании свёрточной нейронной сети для модели тепловой погрешности шпинделя шлифовального станка. Реализованная на этой модели компенсация тепловой погрешности для круглошлифовального станка позволила увеличить абсолютную точность позиционирования обрабатываемых поверхностей вала более чем на 84 %.

Двусторонние торцешлифовальные станки имеют достаточно ограниченную область применения, что и объясняет отсутствие большого объёма исследований в открытой печати как в мире, так и в России. Но потребность в обеспечении точности обработки на этих типах станков сохраняется [18–21]. Поэтому ниже приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния источников тепловыделения на формирование температур и температурных перемещений несущей системы двустороннего торцешлифовального станка.

Оценка влияния источников тепловыделения на формирование температур и температурных перемещений двустороннего торцешлифовального станка. Эксперименты проводились на станке модели 3А343АДФ2 с индивидуальным баком охлаждения. Температура характерных точек станка и изменение углового положения кругов оценивалось по методикам, изложенным в работах [22, 23]. Кроме температуры элементов несущей системы станка контролировались температуры окружающей среды и СОЖ, выходящей из станка. Температура измерялась в точках, показанных на рис. 1 [22, 23].

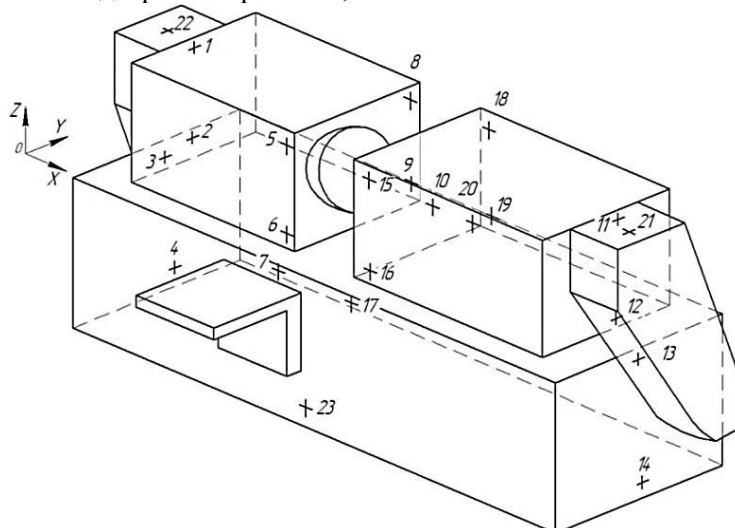


Рис. 1. Схема распределения контрольных точек измерения температур (редуктор с диском подачи не показаны) [22, 23]

На основе исследований, изложенных в [22–24], определено влияние источников тепловыделения на нагрев и температурные перемещения. Неравномерность нагрева станины является ос-

новной причиной изменения углового положения шлифовальных кругов станка и, как следствие – увеличения погрешности обработки. Узлы торцешлифовального станка при работе на

холостом ходу и при работе под тепловой нагрузкой нагреваются неодинаково. Наибольшие температуры при работе станка на холостом ходу имеют торцы шпиндельных бабок и станины, а при работе под тепловой нагрузкой – части станины, находящиеся вблизи ограждения зоны шлифования и торцы шпиндельных бабок, обращенные к ограждению. Наименее нагретыми остаются торцовые стенки и нижняя часть станины.

Была предпринята попытка улучшения тепловых характеристик станка, которая должна была привести к уменьшению или симметричности тепловых деформаций станка. Было реализовано несколько схем перераспределения тепловых потоков (рис. 2).

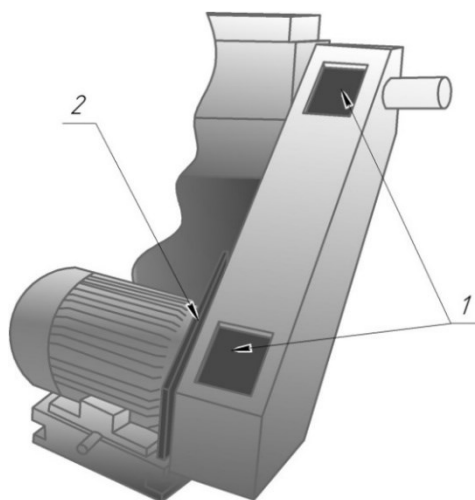


Рис. 2. Схемы перераспределения тепловых потоков:

1 – специальные окна в кожухе; 2 – изоляция теплового потока от электродвигателей

Первые три схемы реализовывались на холостом ходу и при работе станка под тепловой нагрузкой. По методикам, описанным в [22–24], проводилось измерение температур станка и изменений взаимного углового положения его кругов.

Изменение углового положения кругов и температуры узлов станка в зависимости от продолжительности работы станка на холостом ходу показано на рис. 3–7. Результаты измерений температурных перемещений шлифовальных кругов по первым трем схемам показаны на рис. 3. Совместная реализация 3-х схем позволила снизить перемещение правого круга на холостом ходу в 1,5 раза, левый круг практически не перемещается. Результаты измерений избыточных температур торцов шпиндельных бабок и торцов станины по первым трем схемам показаны на рис. 5, 7.

Испытание разработанных схем при работе станка под тепловой нагрузкой существенных изменений по улучшению тепловых характеристик не дало (вследствие этого

Схема 1: тепловой поток главных электродвигателей, направляемый под защитный кожух приводного шкива, и тепловой поток ременной передачи выводятся через специальные окна в кожухе в окружающую атмосферу, а не концентрируется у торцов шпиндельных бабок.

Схема 2: совместно со схемой 1 предусматривалось охлаждение торцов шлифовальных бабок с помощью крыльчатки, закрепленной на каждом приводном шкиве.

Схема 3: совместно со схемой 2 предусматривалась изоляция теплового потока от левого и правого электродвигателей.

Схема 4: нагрев торцов станины при работе под тепловой нагрузкой.

результаты исследования не приводятся).

Гипотетически для устранения неравномерности нагрева элементов несущей системы станка можно было подогреть наименее нагретые участки станины, то есть создать деформации противоположного направления. Наименее нагретыми участками станины являются нижняя ее часть и торцы. При перенесении зоны наибольших избыточных температур в нижнюю часть станины, изгиб в вертикальной плоскости произойдет в обратном направлении. Наличие установочных элементов под станиной станка в центральной части не позволит направить деформации станины в вертикальной плоскости вниз, для этого потребуется убрать установочные элементы из-под станины в центральной ее части, что создает условия для появления вибраций станка во время его работы. Отсутствие в нижней части станины удобных участков поверхности для дополнительного подогрева делает невозможной практическую реализацию данного способа нагрева станины.

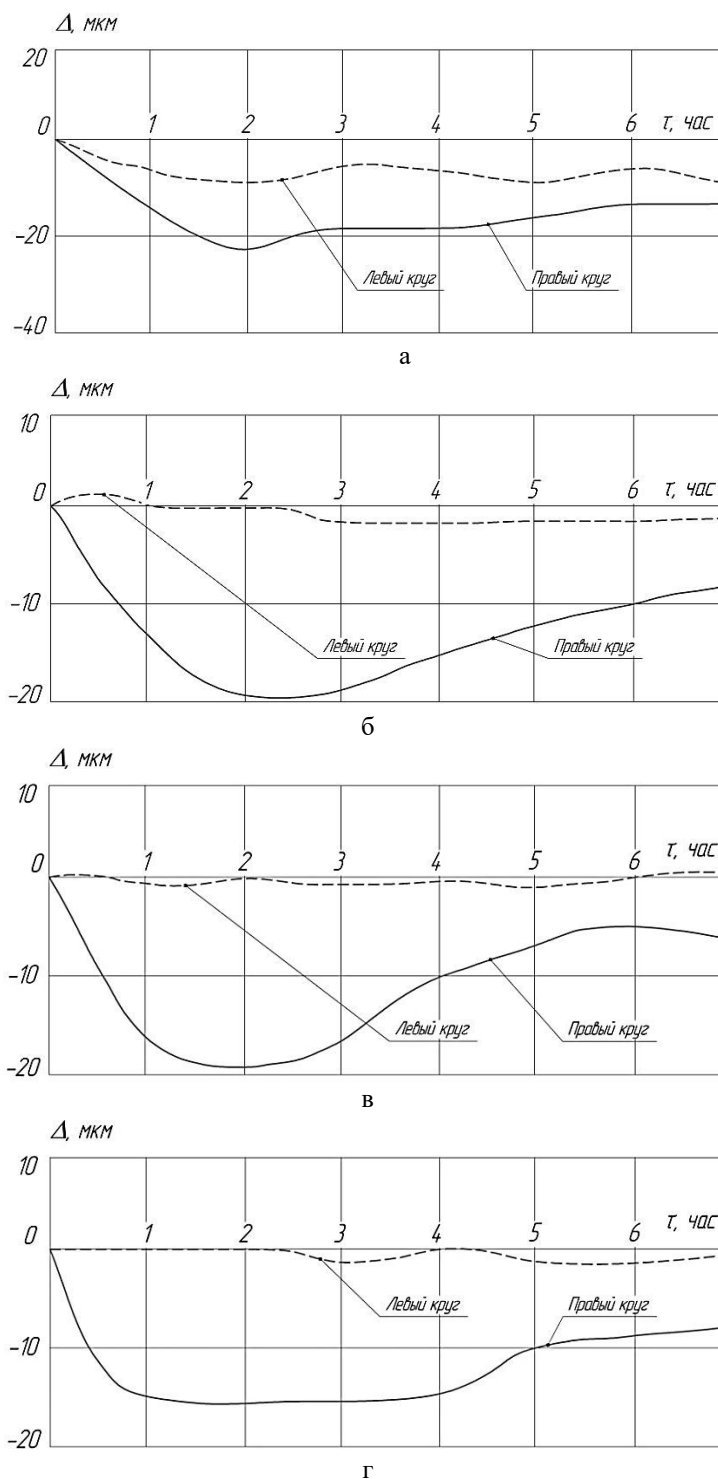


Рис. 3. Температурные перемещения шлифовальных кругов при испытании различных схем тепловых потоков на холостом ходу:

а – базовый вариант; б – схема 1; в – схема 2; г – схема 3 с ограждением двигателей

При лабораторной реализации схемы 4 в качестве подогрева торцов станины станка использовались дополнительные баки с подогреваемой с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭН) смазочно-охлаждающей жидкостью [25]. Одной из стенок бака являлся торец станины. Это позволило компенсировать тепловые деформации от нагрева в центральной части станины, и уменьшить изменения углового положения

шлифовальных кругов. Реализация этого способа в производственных условиях осложняется необходимостью непрерывного контроля за скоростью изменения температуры СОЖ в торцовых баках за счет переключения мощности ТЭН через определенные промежутки времени, так как скорости нарастания температуры СОЖ в центральных и торцовых баках различны. Задача разрешима при введении адаптивного управления мощностью ТЭН в торцовых баках в

зависимости от температуры СОЖ в центральном баке, но приводит к дополнительным материальным затратам. Избыточные температуры СОЖ в торцовых баках при этом значительны: при избыточной температуре СОЖ в центральном баке – 30 °С избыточная температура в торцовых баках составляет 75 °С. Эти ранее полученные результаты экспериментальных исследований, представленные в [25], были подтверждены в вычислительном эксперименте с использованием системы Ansys. Для этого сначала была разработана геометрическая 3D-модель несущей системы станка, состоящей почти из 50 компонентов. После этого были разработаны сеточная и расчётная модели. Идентификация

термодеформационной модели несущей системы станка осуществлялась в два этапа. Сначала на первом этапе по известным экспериментальным данным температур и температурных перемещений для станка без нагревания торцов станины [24, 26] были приложены тепловые потоки и заданы качественные и количественные условия конвективного теплообмена. На втором этапе, используя ранее отлаженную расчётную модель в качестве базовой, прикладывали тепловые потоки по торцам станины до обеспечения требуемого соотношения температурных перемещений торцовых поверхностей фланцев обоих шпинделей. Деформированное состояние несущей системы станка и его контурное изображение представлены на рис. 8.

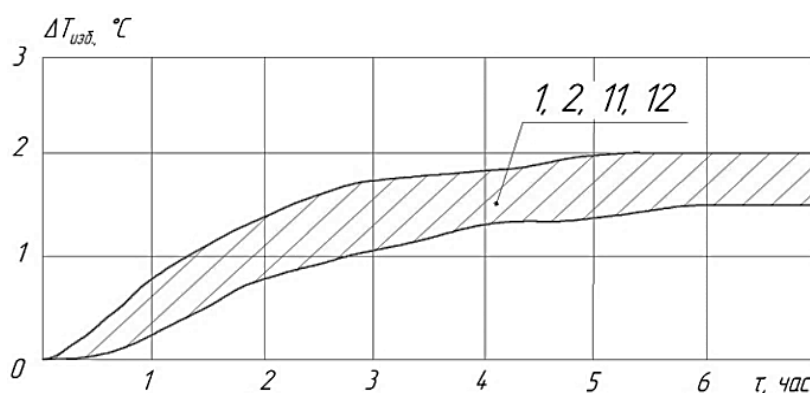


Рис. 4. Изменения температур характерных точек торцов шпиндельных бабок станка при работе на холостом ходу: избыточные температуры в базовом варианте (точки 1, 2, 11, 12)

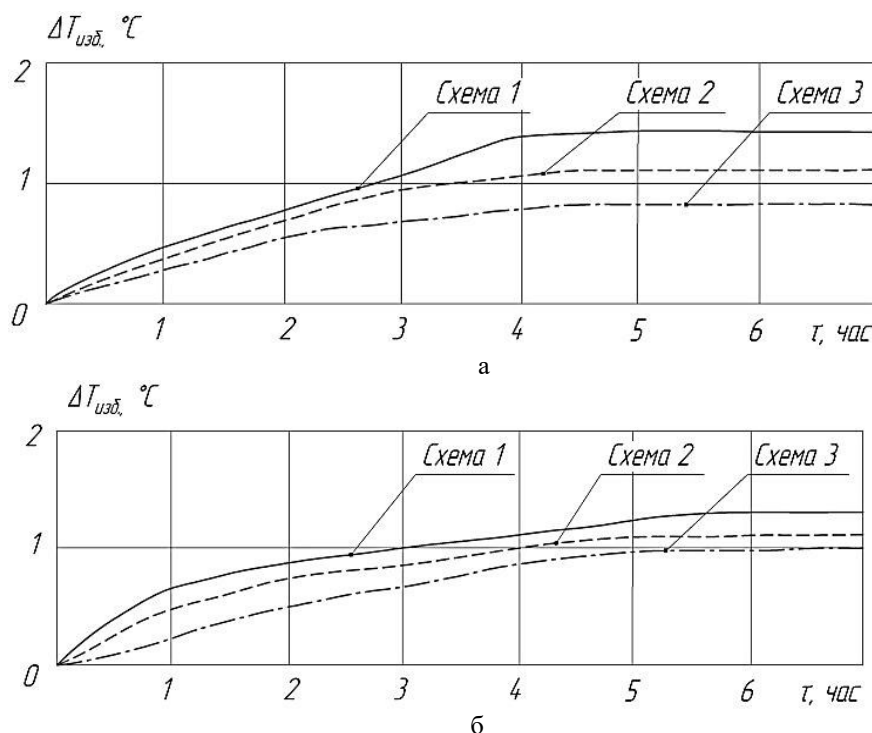


Рис. 5. Изменение температуры характерных точек торцов шпиндельных бабок станка при испытании различных схем тепловых потоков:
а – избыточные температуры верхней части торцов (точки 1, 11);
б – избыточные температуры нижней части торцов (точки 2, 12)

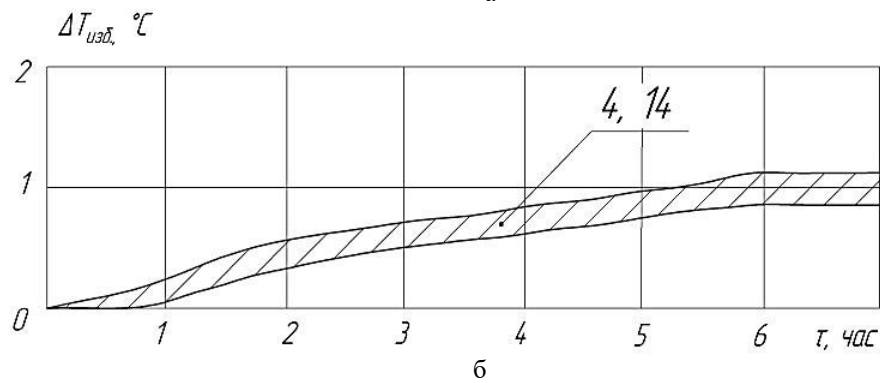
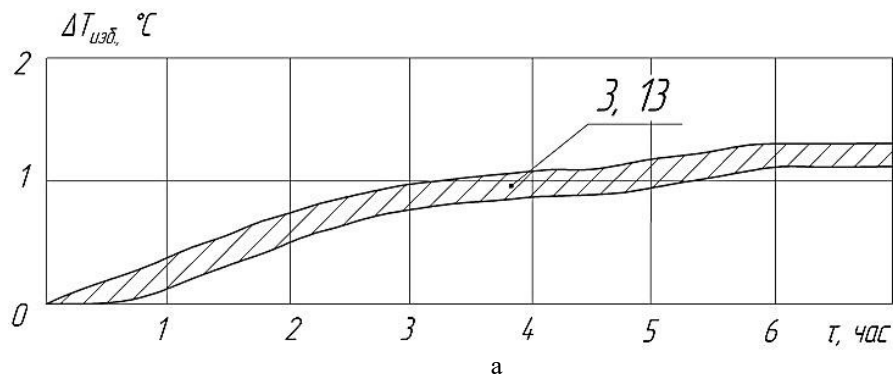


Рис. 6. Изменения температуры характерных точек торцов станины станка при работе на холостом ходу в базовом варианте:

а – избыточные температуры верхней части торцов станины (точки 3, 13);
б – избыточные температуры нижней части торцов станины (точки 4, 14)

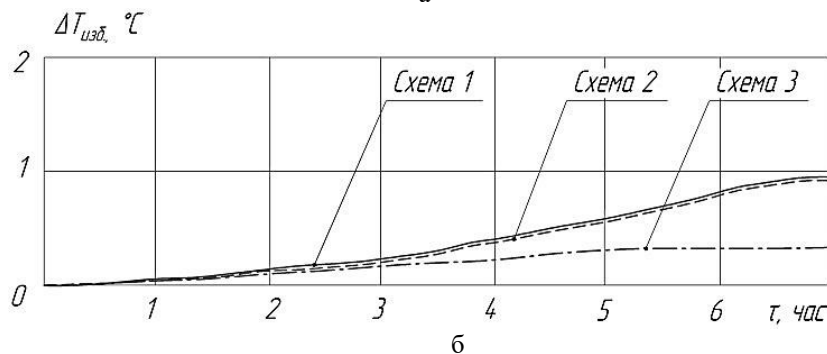
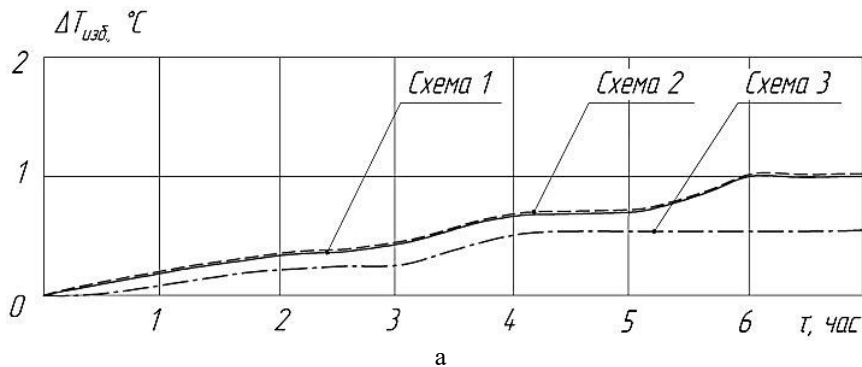


Рис. 7. Изменение температуры характерных точек торцов станины станка при испытании различных схем тепловых потоков:

а – избыточные температуры верхней части торцов (точки 3, 13);
б – избыточные температуры нижней части торцов (точки 4, 14)

Выводы. Результаты натурных экспериментов показали, что несимметричность тепловых перемещений кругов относительно диска подачи заготовок происходит вследствие

того, что тумба, на которой установлен редуктор диска подачи заготовок, закреплена на станине несимметрично относительно шлифовальных бабок и сдвинута в сторону левой бабки. Станина

относительно своего центра деформируется симметрично, так как левый круг и диск подачи имеют незначительные тепловые деформации, а

все перемещения происходят за счет правой части станка.

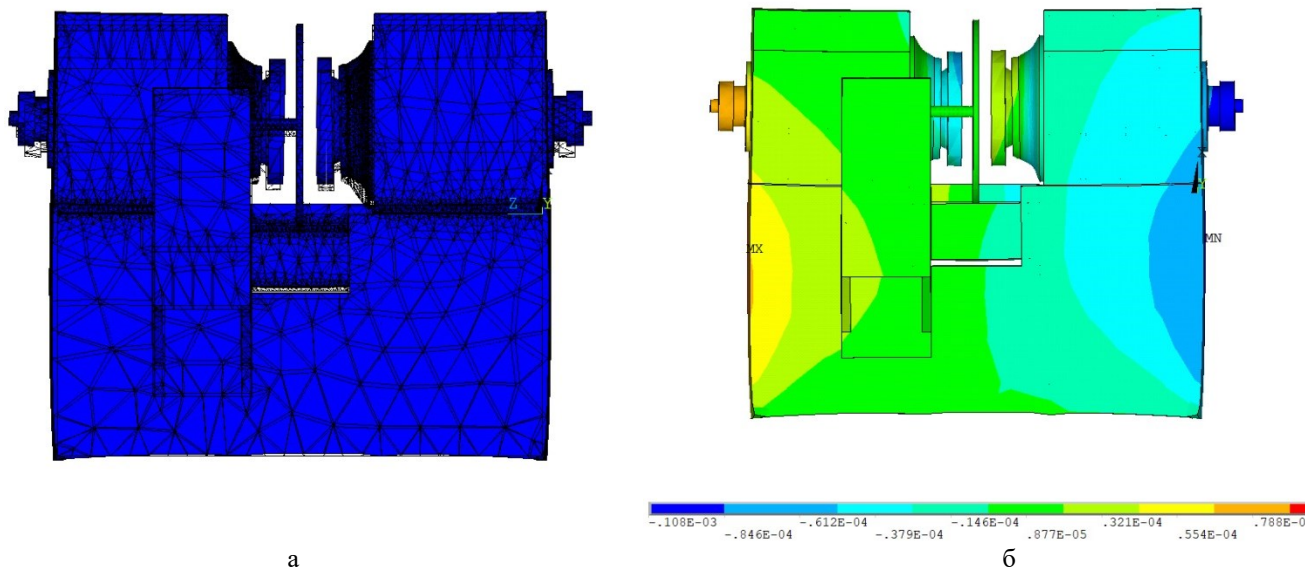


Рис. 8. Деформированное состояние станка при нагреве торцов станины при работе под тепловой нагрузкой: а – деформированное и недеформированная сеточная модель; б – контурное представление деформаций

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что, для дальнейшего повышения качества работы станков данного типа необходимы такие мероприятия, которые бы количественно уменьшили тепловые деформации и обеспечили симметричность поведения несущей системы станка во всех температурно-временных диапазонах:

- уменьшение тепловых деформаций станка за счет охлаждения в базовой конструкции, а именно: увеличения теплоотвода из центральных внутренних полостей станины станка, увеличение площади теплоотводящей поверхности станины станка; применение нетрадиционных материалов для поддона станка;

- обеспечение симметричности тепловых деформаций станка относительно диска подачи за счет оптимального размещения тумбы и ее конструкции.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержки из федерального бюджета в 2021 году гранта в форме субсидии на реализацию программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в рамках соглашений № 075-15-2021-1171, 075-15-2021-1112.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fiocchi A.A., Fortulan C.A., de Angelo Sanchez L.E. Ultra-precision face grinding with constant pressure, lapping kinematics, and SiC grinding wheels dressed with overlap factor // *Int J Adv Manuf Technol*. 2015. Vol. 79. Pp. 531–1543.

doi:10.1007/s00170-015-6933-5.

2. Corbett J., Morantz P., Stephenson D.J., Read R.F. An Advanced Ultraprecision Face Grinding Machine // *Int J Adv Manuf Technol*. 2002. Vol. 20. Pp. 639–648. doi:10.1007/s001700200201.

3. Tonnellier X., Morantz P., Shore P., Comley P. Precision grinding for rapid fabrication of segments for extremely large telescopes using the Cranfield BoX. In *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation* // *International Society for Optics and Photonics*. 2010. Vol. 7739. p. 773905. doi:10.1117/12.858806.

4. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect // *Int J Adv Manuf Technol*. 2019. Vol. 103. Pp. 4317–4329. doi:10.1007/s00170-019-03650-0.

5. Liu T., Deng Z., Lv L., Yi J., She S., Wan L. Theoretical and experimental study of temperature field in noncircular high-speed grinding // *Int J Adv Manuf Technol*. 2020. Vol. 107. Pp. 3581–3592. doi:10.1007/s00170-020-05295-w.

6. Jin T., Yi J., Li P. Temperature distributions in form grinding of involute gears // *Int J Adv Manuf Technol*. 2017. Vol. 88. Pp. 2609–2620. doi:10.1007/s00170-016-8971-z.

7. Su J.X., Ke Q.X., Deng X.Z., Deng X.Z., Ren X.Z. Numerical simulation and experimental analysis of temperature field of gear form grinding // *Int J Adv Manuf Technol*. 2018. Vol. 97. Pp. 2351–2367. doi:10.1007/s00170-018-2079-6

8. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques,

engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // J Intell Manuf. 2020. Vol. 31. Pp. 1313–1337. doi:10.1007/s10845-019-01512-w.

9. Liu J., Gui H., Ma C. Digital twin system of thermal error control for a large-size gear profile grinder enabled by gated recurrent unit // J Ambient Intell Human Comput. 2021. doi:10.1007/s12652-021-03378-4.

10. Zhao Z., Wang S., Wang Z., Ma C., Yang B. Surface roughness stabilization method based on digital twin-driven machining parameters self-adaption adjustment: a case study in five-axis machining // J Intell Manuf. 2020. doi:10.1007/s10845-020-01698-4.

11. Fan K., Gao R., Zhou H., Zhao Y., Tian S., Xie Y. An optimization method for thermal behavior of high-speed spindle of gear form grinding machine // Int J Adv Manuf Technol. 2020. Vol. 107. Pp. 959–970. doi:10.1007/s00170-020-05095-2.

12. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2019. Vol. 20. Pp. 13–25. doi:10.1007/s12541-019-00037-9.

13. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools // Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 91. Pp. 577–587. doi:10.1007/s00170-016-9442-2.

14. Zhang Xl., Yao B., Feng W., Shen Zh., Wang Mm. Modeling of a virtual grinding wheel based on random distribution of multi-grains and simulation of machine-process interaction // J. Zhejiang Univ. Sci. A. 2015. Vol. 16. Pp. 874–884. doi:10.1631/jzus.A1400316.

15. Su J., Zhang H., Jiang C., Nie S. Prediction and experimental study on thermal stress in multi-tooth form grinding of cycloid gear // Int J Adv Manuf Technol. 2021. Vol. 117. Pp. 187–198. doi:10.1007/s00170-021-07677-0.

16. Cao W., Li H., Li Q. A method of thermal error prediction modeling for CNC machine tool spindle system based on linear correlation // Int J Adv Manuf Technol. 2021. Vol. 118. Pp. 3079–3090. doi:10.1007/s00170-021-08165-1.

17. Fan J., Wang P., Tao H., Pan R. A thermal deformation prediction method for grinding machine' spindle // Int J Adv Manuf Technol. 2022. Vol. 118. Pp. 1125–1139. doi:10.1007/s00170-021-07931-5.

18. Deja M., Lichtschlag L., Uhlmann E. Thermal and technological aspects of double face

grinding of C45 carbon steel // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 64. Pp. 1036–1046. doi:10.1016/j.jmapro.2021.02.023.

19. Uhlmann E., Lichtschlag L. Analysis of influencing factors for the dressing process in double side face grinding // Int J Adv Manuf Technol. 2021. Vol. 112. Pp. 1571–1581. doi:10.1007/s00170-020-06507-z.

20. Vainer L., Gamolya U. Analysis and modeling of workpieces' kinematic in the process of two-sided face grinding // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Pp. 1794–1798. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.292.

21. Vainer L.G. Regularities of motion and accuracy of double-sided processing of cylindrical rollers // XII International scientific and technical conference «Applied Mechanics and Systems Dynamics». Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1210. doi:10.1088/1742-6596/1210/1/012152.

22. Никитина И.П., Поляков А.Н. Проблемы теплоустойчивости двусторонних торцевшлифовальных станков / Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. научных трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. // Юго-Западный государственный университет (Курск, 28 июня 2019 г.), Курск: Изд-во Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 6–12.

23. Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцевшлифовального станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 112–120. doi:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120.

24. Никитина И.П., Поляков А.Н. Особенности протекания тепловых процессов в двусторонних торцевшлифовальных станках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 1. С. 82–94. doi:10.34031/2071-7318-2021-6-1-82-94.

25. Андрианова И.А., Шахновский С.С. Повышение точности двустороннего торцового шлифования путем стабилизации температуры СОЖ // Станки и инструмент. 1984. №1. С. 23–24.

26. Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г. Симуляция термдеформационного поведения двусторонних торцевшлифовальных станков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 90–101. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101.

Информация об авторах

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Воронин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: d.voronin@zbo.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 21.04.2022 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г., 2022

**Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G.*

Orenburg state University

**E-mail: innanikitina@list.ru*

EXPERIMENTAL MEASURES TO IMPROVE THERMAL CHARACTERISTICS IN DOUBLE-SIDED FACE GRINDING MACHINES

Abstract. *The results of full-scale and computational experiments to improve the thermal characteristics of the machine tool are presented. This can lead to a decrease or achieve symmetry of the resulting thermal deformations. The implementation of four schemes for the redistribution of heat fluxes is considered: the heat flux of the main electric motors, directed under the protective casing of the drive pulley, and the heat flux of the belt drive are removed through special windows in the casing to the environment; jointly with the first scheme of redistribution of heat fluxes, cooling of the ends of the grinding headstocks is provided with the help of an impeller fixed on each drive pulley; jointly with the second scheme, heat flux isolation from the left and right electric motors is provided; heating the ends of the machine tool bed. The first three schemes are implemented at idling of the machine tool; the fourth scheme is implemented when the machine is operating under thermal load. The joint implementation of three schemes makes it possible to reduce the displacement of the right circle at idle by 1.5 times, the left circle practically did not move. The test of the first three circuits during the operation of the machine tool under a thermal load does not reveal significant changes in the thermal characteristics. The implementation of the fourth heat flux redistribution scheme help to compensate for thermal deformations from heating in the central part of the bed and reduce changes in the angular position of the grinding wheels.*

Keywords: *face grinding machines, thermal deformations, temperature displacements, redistribution of heat fluxes.*

REFERENCES

1. Fiocchi A.A., Fortulan C.A., de Angelo Sanchez L.E. Ultra-precision face grinding with constant pressure, lapping kinematics, and SiC grinding wheels dressed with overlap factor. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015. Vol. 79. Pp. 531–1543. doi:10.1007/s00170-015-6933-5.
2. Corbett J., Morantz P., Stephenson D.J., Read R.F. An Advanced Ultraprecision Face Grinding Machine. *Int J Adv Manuf Technol.* 2002. Vol. 20. Pp. 639–648. doi:10.1007/s001700200201.
3. Tonnellier X., Morantz P., Shore P., Comley P. Precision grinding for rapid fabrication of segments for extremely large telescopes using the Cranfield BoX. In *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics. 2010. Vol. 7739. 773905. doi:10.1117/12.858806.
4. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect. *Int J Adv Manuf Technol.* 2019. Vol. 103. Pp. 4317–4329. doi:10.1007/s00170-019-03650-0.
5. Liu T., Deng Z., Lv L., Yi J., She S., Wan L. Theoretical and experimental study of temperature field in noncircular high-speed grinding. *Int J Adv Manuf Technol.* 2020. Vol. 107. Pp. 3581–3592. doi:10.1007/s00170-020-05295-w.
6. Jin T., Yi J., Li P. Temperature distributions in form grinding of involute gears. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. Vol. 88. Pp. 2609–2620. doi:10.1007/s00170-016-8971-z.
7. Su J.X., Ke Q.X., Deng X.Z., Deng X.Z., Ren X.Z. Numerical simulation and experimental analysis of temperature field of gear form grinding. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. Vol. 97. Pp. 2351–2367. doi:10.1007/s00170-018-2079-6.
8. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *J Intell Manuf.* 2020. Vol. 31. Pp. 1313–1337. doi:10.1007/s10845-019-01512-w.

9. Liu J., Gui H., Ma C. Digital twin system of thermal error control for a large-size gear profile grinder enabled by gated recurrent unit. *J Ambient Intell Human Comput.* 2021. doi:10.1007/s12652-021-03378-4.
10. Zhao Z., Wang S., Wang Z., Ma C., Yang B. Surface roughness stabilization method based on digital twin-driven machining parameters self-adaption adjustment: a case study in five-axis machining. *J Intell Manuf.* 2020. doi:10.1007/s10845-020-01698-4.
11. Fan K., Gao R., Zhou H., Zhao Y., Tian S., Xie Y. An optimization method for thermal behavior of high-speed spindle of gear form grinding machine. *Int J Adv Manuf Technol.* 2020. Vol. 107. Pp. 959–970. doi:10.1007/s00170-020-05095-2.
12. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019. Vol. 20. Pp. 13–25. doi:10.1007/s12541-019-00037-9.
13. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. Vol. 91. Pp. 577–587. doi:10.1007/s00170-016-9442-2.
14. Zhang Xl., Yao B., Feng W., Shen Zh., Wang Mm. Modeling of a virtual grinding wheel based on random distribution of multi-grains and simulation of machine-process interaction. *J. Zhejiang Univ. Sci. A.* 2015. Vol. 16. Pp. 874–884. doi:10.1631/jzus.A1400316.
15. Su J., Zhang H., Jiang C., Nie S. Prediction and experimental study on thermal stress in multi-tooth form grinding of cycloid gear. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021. Vol. 117. Pp. 187–198. doi:10.1007/s00170-021-07677-0.
16. Cao W., Li H., Li Q. A method of thermal error prediction modeling for CNC machine tool spindle system based on linear correlation. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021. Vol. 118. Pp. 3079–3090. doi:10.1007/s00170-021-08165-1.
17. Fan J., Wang P., Tao H., Pan R. A thermal deformation prediction method for grinding machine' spindle. *Int J Adv Manuf Technol.* 2022. Vol. 118. Pp. 1125–1139. doi:10.1007/s00170-021-07931-5.
18. Deja M., Lichtschlag L., Uhlmann E. Thermal and technological aspects of double face grinding of C45 carbon steel. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021. Vol. 64. Pp. 1036–1046. doi:10.1016/j.jmapro.2021.02.023.
19. Uhlmann E., Lichtschlag L. Analysis of influencing factors for the dressing process in double side face grinding. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021. Vol. 112, Pp. 1571–1581. doi:10.1007/s00170-020-06507-z.
20. Vainer L., Gamolya U. Analysis and modeling of workpieces' kinematic in the process of two-sided face grinding. *Materials Today: Proceedings.* 2021. Vol. 38. Pp. 1794–1798. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.292.
21. Vainer L.G. Regularities of motion and accuracy of double-sided processing of cylindrical rollers. XII International scientific and technical conference «Applied Mechanics and Systems Dynamics». *Journal of Physics: Conference Series.* 2018. Vol. 1210. doi:10.1088/1742-6596/1210/1/012152.
22. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Problems of heat resistance of bilateral face grinding machines [Problemy teploustojchivosti dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya». YUGo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. 2019. Pp. 6–12. (rus)
23. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental investigation of the temperature and accuracy characteristics of a bilateral face grinding machine [Eksperimental'noe issledovanie temperaturnyh i tochnostnyh harakteristik dvustoronnego torceshlifoval'nogo stanka]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2019. No. 11. Pp. 112–120. doi:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120. (rus)
24. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Features of the flow of thermal processes in double-sided face grinding machines [Osobennosti protekaniya teplovyh processov v dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankah]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2021. No. 1. Pp. 82–94. doi:10.34031/2071-7318-2021-6-1-82-94. (rus)
25. Andrianova I.A., SHahnovskij S.S. Improving the accuracy of double-sided face grinding by stabilizing the coolant temperature [Povyshenie tochnosti dvustoronnego torcovogo shlifovaniya putem stabilizacii temperatury SOZH]. *Stanki i instrument.* 1984. No. 1. Pp. 23–24. (rus)
26. Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G. Simulation of thermal deformation behavior of double-sided face grinders [Simulyaciya termodeformacionnogo povedeniya dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2022. No. 1. Pp. 90–101. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-1-90-101. (rus)

Information about the authors

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Voronin, Dmitriy G. Postgraduate student. E-mail: dvoronin@zbo.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 21.04.2022

Для цитирования:

Никитина И.П., Поляков А.Н., Воронин Д.Г. Экспериментальные мероприятия по улучшению тепловых характеристик в двусторонних торцевшлифовальных станках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 116–126. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-116-126

For citation:

Nikitina I.P., Polyakov A.N., Voronin D.G. Experimental measures to improve thermal characteristics in double-sided face grinding machines. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 116–126. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-116-126